

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Opakovač impedance
Impedance repeater

Zadání bakalářské práce

Student:

Petr Sedláček

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Opakovač impedance
Impedance Repeater

Zásady pro vypracování:

V anténní technice se často setkáváme s potřebou přenést obecnou vstupní impedanci antény ze svorek antény na stůl k vysílači či přijímači. Opakovač impedance s výhodou použijeme tehdy, když je konstrukčně nemožné použití běžných impedančních přizpůsobovacích obvodů přímo u svorek antény. Práce splňovat následující body:

1. Popis principu funkce laděných napáječů.
2. Měřením ověřit funkci tzv. půlvlnného opakovače impedance.
3. Vyhodnocení měření.

Seznam doporučené odborné literatury:


BANALIS, Constantine A. *Antenna Theory : Analysis and design*. 3rd edition. United States : [s.n.], 2005. 1117 s. ISBN 0-471-66782-X.

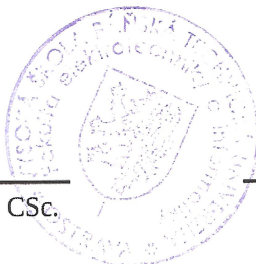
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Dvorský, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry

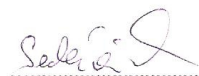



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 5.5.2013

Handwritten signature of Sedláček in black ink, written over a dotted line.

podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Markovi Dvorskému, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

Abstrakt

V mé bakalářské práci popisuji vysokofrekvenční vedení, jeho vlastnosti, primární a sekundární parametry. Popisuji, jak vysokofrekvenční vedení pracuje v aplikacích s různými impedancemi a jak se projevuje jeho geometrická délka na vstupní a výstupní impedanci. Zjišťuji, jak se chová půlvlnné vedení pro zátěže různých charakterů, ověřuji jestli se naměřené hodnoty jednotlivých půlvlnných vedení liší od hodnot teoretických. Zjišťuji, ve kterém frekvenční pásmu je půvltné vedení použitelné a ve kterém místě již začíná být změna impedance neúnosná. Zjišťuji jak se půvltné vedení chová na celých násobcích půvltny. Porovnávám, které anténí vedení má nejlepší přenosové vlastnosti z hlediska přenosu impedance.

Klíčová slova

Impedanční opakovač, Vysokofrekvenční vedení, Půvltné vedení, Symetrické vedení, Asymetrické vedení, Charakteristická impedance, Smithův diagram

Abstract

In my work I describe the high-frequency line, his properties, primary and secondary parameters. I describe, how high-frequency lines working in applications with different impedances and as manifested by the geometric length of the high-frequency lines to the input and output impedance. I realize how half-wave line work for burdens of different characters. I check if the measured values of half-wave line differs from the theoretical values. I find where the band is half-wave line applicable and in which place becomes unbearable impedance change. I find how a half-wave line behaves in whole multiples of half-wave. I Comparing who antenna transmission line has the best qualities for transfer impedance.

Key words

Impedance repeater, High-frequency line, Half-wave line, Symmetric line, Asymmetric line, Characteristic impedance, Smith chart

Seznam použitých symbolů, zkratek a termínů

λ_{el} [m]	Vlnová délka elektrická
λ_g [m]	Vlnová délka geometrická
ρ [-]	Činitel odrazu
ρ_{Lx} [-]	Činitel odrazu přijímače
ρ_{Tx} [-]	Činitel odrazu vysílače
A [dBm]	Měrný útlum
GDO	Grid dip oscilátor
E_i [-]	Amplituda postupné vlny
E_r [-]	amplituda odražené vlny
k_{zrk} [-]	Zkracovací činitel
Rx	Přijímač
Tx	Vysílač
VF	Vysokofrekvenční
Z_A [Ω]	Impedance antény
Z_L [Ω]	Impedance vedení
Z_{Tx} [Ω]	Impedance vysílače
Z_{Rx} [Ω]	Impedance přijímače

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Vysokofrekvenční napaječe.....	2
2.1 Primární parametry.....	2
2.2 Sekundární parametry.....	4
2.3 Další vlastnosti vedení.....	5
2.4 Lazený napaječ.....	7
2.4.1 Symetrický napaječ.....	7
2.4.2 Asymetrický napaječ.....	8
2.4.3 Vlnovod.....	9
3 Impedanční opakovač.....	10
3.1 Transformace impedance.....	10
3.2 Opakování impedance.....	13
3.2.1 Asymetrický napaječ s charakteristickou impedancí 50 Ω	16
3.2.2 Asymetrický napaječ s charakteristickou impedancí 75 Ω	19
3.2.3 Symetrický napaječ s charakteristickou impedancí 450 Ω	22
3.3 Impedance v závislosti na frekvenci.....	25
3.4 Impedance při násobcích	29
3.5 Vyhodnocení měření.....	30
4 Závěr.....	31
5 Použitá literatura.....	32

1 Úvod

Cílem mé bakalářské práce je prostudovat anténí napaječe, porovnat jejich technické řešení a objasnit jejich princip činnosti, zejména pak půlvlnného napaječ, známějšího jako impedanční opakovač. V rádiové technice se setkáváme s nutností správně propojit anténu s vysílačem tak, aby bylo dosaženo co největší efektivity. Kde anténu nemůžeme připojit přímo k vysílači, musíme použít vysokofrekvenční vedení, neboli napaječ. V některých realizacích tohoto zapojení se využívá vlastností vedení o délce $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,5$. V současné literatuře se toto téma příliš nerozebírá, nahlíží se na něj jako na samozřejmý jev, i když vlastností půlvlnného vedení se využívá v mnoha aplikacích, i těch, které nejsou přímo spojeny s anténí technikou.

V kapitole 2 se zabírám vlastnostmi Vysokofrekvenčního (dále jen VF) vedení, charakteristickou impedancí a odrazy. Dále se v této kapitole zabírám rozdělením VF napaječů. V kapitole 3 se zabírám opakovačem impedance. Zkoumám transformování impedance na VF napaječích. Zaměřuji se především na opakování impedance v místě $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,5$.

2 Vysokofrekvenční napaječe

Pro napaječ platí tři základní pravidla:

- musí být dimenzován pro svůj přenášený výkon
- musí přenášet elektromagnetickou energii s co nejmenší ztrátou
- nesmí vyzařovat svou energii do okolí.

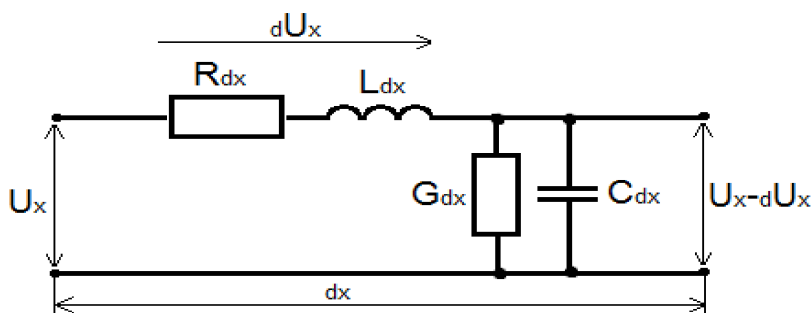
Vysokofrekvenční (dále jen VF) napaječ je VF vedení, které přivádí energii od zdroje k anténě. VF napaječe mohou být lazené, nebo přizpůsobené. Může se jednat o tentýž fyzický kus kabele, rozdíl je, jak je aplikován. Pokud VF napaječ propojuje prvky anténa – přijímač/vysílač a

$Z_A = Z_{Tr}/Z_{Rx} = Z_L$ jedná se o přizpůsobený VF napaječ. Pokud ale VF napaječ propojuje prvky anténa – přijímač/vysílač tak, že $Z_A \neq Z_{Tr}/Z_{Rx} \neq Z_L$ a obvod je přesto impedančně přizpůsoben, jedná se o lazený napaječ. Třetí možnost propojení antény je pomocí opakovací impedance, kdy přizpůsobení obvodu provádíme zpravidla pomocí přizpůsobovacího článku, protože

$Z_A \neq Z_{Tr}/Z_{Rx}$, nebo platí, že $Z_A = Z_{Tr}/Z_{Rx}$ a opakovací impedance, nám přivede impedanci ze vstupu na výstup, takže obvod je impedančně přizpůsoben. Se zvyšující se frekvencí se na elektrickém vedení, kromě číného odporu, začínají projevovat i další veličiny jež nazýváme primárními parametry.

2.1 Primární parametry

Vedení můžeme rozdělit na dva základní druhy, homogenní a nehomogenní. Homogenní vedení je takové, které má po celé své délce stejné primární i sekundární parametry. Nehomogenní vedení naproti tomu parametry po celé své délce stejné nemá. Každé homogenní vedení má primární a sekundární parametry. Primární parametry jsou: měrný odpor R [Ω/km], měrný svod G [S/km], měrná indukčnost L [H/km], měrná kapacita C [F/km]. Primární parametry vedení jsou závislé na frekvenci a materiálu. Sekundární parametry počítáme z parametrů primárních. Jsou to především měrná míra přenosu γ a charakteristická impedance Z_L . Primární parametry můžeme následovně překreslit.



Obr. 2.1: Primární parametry asymetrického vedení. Obrázek znázorňuje jak můžeme překreslit kterýkoliv úsek vedení na základní parametry.

Měrný odpor můžeme vyjádřit jako

$$R = R_s (k_s k_0) \quad [\Omega/\text{km}] \quad (2.1)$$

kde

R_s - stejnosměrný odpor, závisí na konstantě materiálu ze kterého je vyroben ρ , délce vodiče l [m] a plochy průřezu S [m²]. Pro stejnosměrný odpor tedy platí:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.2)$$

k_s - činitel zvětšení odporu vlivem skin-effektu, závisí na frekvenci. Pro frekvence menší než je kritický kmitočet f_k platí

$$k_s = 1,25 \left(\frac{f}{f_k} \right)^2 \quad (2.3)$$

pro frekvence větší než je kritický kmitočet f_k platí,

$$k_s = 0,12 d (\sqrt{f}) + 0,25 \quad (2.4)$$

přičemž d [m] je průměr vodiče.

Měrný svod se skládá ze dvou složek. U kabelových vedení bývá mnohdy pro své malé hodnoty zanedbáván. Měrný svod vyjadřujeme vztahem

$$G(\omega) = G_0 + k_g \omega C_p \quad [\text{S/km}] \quad (2.5)$$

kde

G_0 - svod při stejnosměrném napětí mezi vodiči

k_g - činitel svodu

C_p - provozní kapacita

Měrnou kapacitu vyjadřujeme vztahem

$$C = 28 \frac{\epsilon_r}{\left(\ln p \frac{a}{d} \right)} \quad [\text{F/km}] \quad (2.6)$$

kde

ϵ_r - poměrná dielektrická konstanta

p - činitel typu prvku vedení

a - vzdálenost vodičů [m]

d - průměr vodiče [m]

Měrnou indukčnost vyjadřujeme vztahem

$$L = 0,4 \ln \frac{2a}{d} + 0,25 \quad [\text{H/km}] \quad (2.7)$$

kde

a - vzdálenost vodičů [m]

d - průměr vodiče [m]

2.2 Sekundární parametry

Měrnou míru přenosu vyjádříme vztahem

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (2.8)$$

kde

α - měrný útlum [dB/km]

β - fázový posun [rad/km]

Charakteristická impedance je z hlediska telekomunikačních technologií velice důležitou veličinou. Vyjadřujeme ji vztahem

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.9)$$

kde

C - Měrná kapacita

R – Měrný odpor

L – Měrná indukčnost

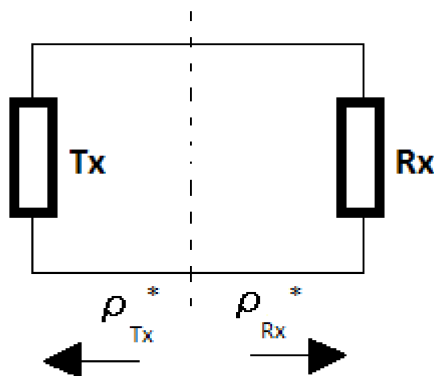
G – Měrný svod

Při zvyšující se frekvenci začne ω nabývat větších a větších rozměrů, až při určité frekvenci můžeme realnou část impedance R a G zanedbat. Dostáváme tudíž zjednodušený vztah a můžeme o Impedanci uvažovat jako o reálné složce.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.10)$$

Charakteristická impedance představuje určité prostředí, ve kterém se vlna šíří. Na rozhraní dvou impedancí se vlna odráží a láme. Důležité je impedanční přizpůsobení, rozumněji tím, že jednotlivé části vedení musí mít stejnou impedanci, aby se tvářily jako celek, neboli jedno prostředí. Není-li vedení impedančně přizpůsobeno, dochází na rozhraní takovýchto dvou prostředí právě k odrazu a lomu. Část energie (vlnění) se odrazí zpět do vedení. Ve vedení se setkávají dvě vlny, vlna přicházející od zdroje a vlna odražená. Tyto vlny se skládají a vzniká zde interference nám známá jako stojatá vlna.

Impedanční přizpůsobení [2][6] je nedílnou otázkou a součástí každého vysokofrekvenčního obvodu. Za impedančně přizpůsobený považujeme obvod, jehož činitelé odrazu zdroje ρ_{Tr} a přijímače ρ_{Lx} jsou komplexně sdružené. Za této situace nedochází ke vzniku stojatého vlnění. Situaci můžeme následovně graficky znázornit. Překreslený přizpůsobený obvod si rozdělíme na pomyslné 2 části, přičemž musí platit, že činitelé odrazu budou čísla komplexně združená a nezávislá na poměru velikostí jednotlivých částí.



Obr. 2.2: Činitel odrazu

Tr – Vysílač

Rx – Přijímač

Musíme si uvědomit, že při odrazu signálu zpět ke zdroji nedochází pouze ke zhoršení kvality signálu, ale i odrazu energie zpět ke zdroji, což způsobuje v lepším případě jeho zahřívání, v horším případě pak zničení zdroje. Pokud se signál odráží na cestě od antény k přijímači, hrozí nám, že nebudeme schopni přijmout signál řádově v mW, protože tento malý signál se odráží na nevyváženém rozhraní zpět k anténě.

Abychom zabránili odrazu signálu zpět ke zdroji, musíme obvod impedančně přizpůsobit. Způsobů přizpůsobení je mnoho. Přizpůsobovací obvody je možné třídit podle různých hledisek. Podle šířky frekvenčního pásma se rozlišují obvody "laděné" (úzkopásmové) a širokopásmové. Přizpůsobovací obvody je možné třídit též dle provedení. Jsou to obvody složené se soustředěných prvků L,C (rezistory se nepoužívají kvůli ztrátám) a obvody složené z úseků vedení.

2.3 Další vlastnosti vedení

Rychlost šíření elektromagnetických vln ve vákuu se rovná rychlosti šíření světla [5]. Je-li jako dielektrikum použito něco jiného než vákuum, je rychlost šíření elektromagnetické vlny menší. Tuto skutečnost můžeme vyjádřit zkracovacím činitelem:

$$k_{zrk} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} \quad (2.11)$$

Pokud neznáme přesnou hodnotu ϵ , jsme schopni na základě měření rezonance porovnat skutečnou vlnovou délku vedení (geometrickou) s vlnovou délkou teoretickou (elektrickou).

$$k_{zrk} = \frac{\lambda_g}{\lambda_{el}} \quad (2.12)$$

Poměr stojatých vln PSV (SWR) je definován [3] jako poměr napětí na vedení v maximu k velikosti napětí v minimu.

$$PSV = \frac{(1 + \rho)}{(1 - \rho)} \quad (2.13)$$

Činitel odrazu vyjádříme vztahem

$$\rho = \frac{E_r}{E_i} \quad (2.14)$$

Kde

ρ - činitel odrazu

E_r - amplituda odražené vlny

E_i - amplituda postupné vlny

PVS nabývá hodnot od 1 - ∞ . Pokud je obvod impedančně správně přispůsoben je $PSV = 1$. V následující tabulce můžeme nalést jak PVS ovlivňuje vyzařovaný výkon .

PSV	Vyzařovaný výkon v %
1	100
1,2	99
1,5	95
2	89
3	75
5	55

Tabulka 2.1 Závislost výkonu na PSV

k_0 činitel zvětšení odporu vlivem blízkosti vodičů - Stejně jako skin-effekt, jev blízkosti má vliv na výsledné rozložení proudové hustoty a ve výsledku způsobuje zvětšení měrného odporu na vysokých frekvencích. Je blízkosti nastává u dvou vodičů téhož vedení, jimiž protéká proud v různých směrech. Vnější silové čáry vyvolané proudem v prvním vodiči způsobí vznik dílčích proudů v druhém vodiči, které na blízké straně prvního vodiče procházející proud zvětší, na odvrácené straně zmenší. Podobně působí i vliv blízkosti vodičů sousedních párů, kovového pláště nebo stínění. Na rozdíl od povrchového jevu, který se zvětšuje se vzrůstající frekvencí, jev blízkosti dosáhne při určitém kmitočtu rovnovážné hodnoty a dále se nemění.

2.4 Lazený napaječ

Lazený napaječ nám plní funkci impedančního přizpůsobení za předpokladu, že $Z_A \neq Z_{Tr}$ a že bude anténí obvod pracovat úzkopásmově, ideálně pouze s jednou frekvencí. Pro potřebné impedanční přizpůsobení musí mít napaječ charakteristické vlastnosti, jako je délka a Z_L

Vhodnou charakteristickou impedanci napaječe spočítáme z rovnice [12]

$$Z_L = \sqrt{Z_A \frac{Z_A R_{Tr} - R_{Tr}^2 - X_{Tr}^2}{Z_A - R_{Tr}}} \quad (2.16)$$

a následně musíme dopočítat délku napaječe

$$\operatorname{tg}(\alpha l_g) = \frac{\sqrt{Z_A(Z_A - R_{Tr})(Z_A R_{Tr} - R_{Tr}^2 - X_{Tr}^2)}}{Z_A X_{Tr}} \quad (2.17)$$

Aby bylo dosaženo reálných veličin Z_L a l_g musí platit následující rovnice

$$Z_A / R_{Tr} \geq 1 + (X_{Tr} / R_{Tr})^2; Z_A / R_{Tr} \leq 1 \quad (2.18)$$

2.4.1 Symetrický napaječ

Za symetrické napaječe jsou považovány takové, jejichž vodiče mají proti zemi stejné primární parametry. Mezi symetrické napaječe můžeme zařadit dvojlinku a část mikropáskových napaječů

Dvojlinka je velice kvalitní napaječ a s jejich útlumem se mohou srovnávat pouze nejlepší koaxiální kabely. Jedná se o symetrické Vf vedení. Oproti koaxiálním kabelům mají velkou nevýhodu a to takovou, že nemohou být umístěné v okolí vodivých předmětů jako jsou, trubky ustřeniho topení, žíly kabelů, atd. V místě přiblížení k takovému vodivému objektu, vzniká ve dvojlince odraz a část energie se odráží zpět k vysílači. Ve dvojlince následně vzniká stojaté vlnění. Za bezpečnou vzdálenost dvojlinky od vodivých předmětů se považuje pětinašobek vzdálenosti vodičů od sebe v kabelu – parametr D. Charakteristická impedance dvojlinky je dána vztahem,

$$Z = 276 \log\left(\frac{D}{r}\right) \quad (2.19)$$

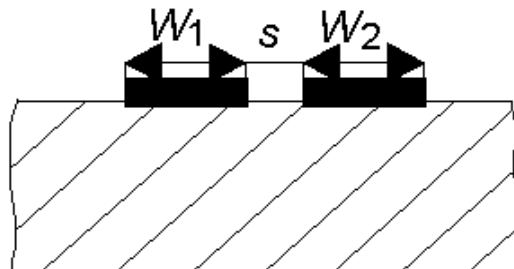
kde r je průměr vodiče



Obr. 2.3: Vysokofrekvenční dvojlinka

Mezi jednotlivými vodiči se nachází dielektrikum, které nám zaručuje, že se vodiče budou nacházet stále ve stejné vzdálenosti od sebe. Druhé provedení dvojlinky bývá slangově označováno jako "žebřík". Jedná se o dvojlinku jejíž dielektrikum se nenachází po celé vzdálenosti mezi vodiči.

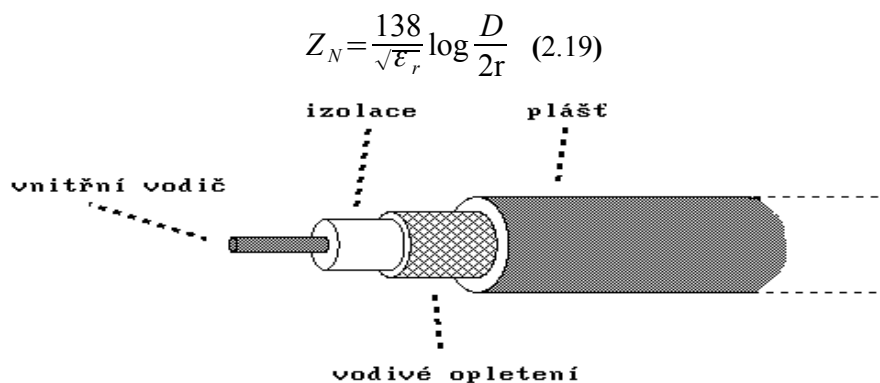
Dalším zástupcem symetrických napáječů je symetrický mikropásek (vyrábí se též v asymetrickém provedení). Jsou realizovány jako plošky vodivé desky na dielektriku. Mikropáskové napáječe se využívají především pro přenos V_f energie na tištěných spojích. Mohou se oběhovat v provedení stíněném i nestíněném. Asymetrický napáječ



Obr. 2.4: Symetrický mikropásek, Typickým uplatněním mikropásku jako V_f napáječe je sběrnice dat.

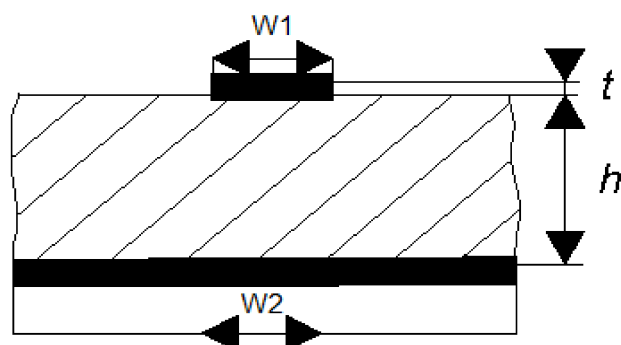
Vodiče asymetrických napáječů mají proti zemi rozdílné primární parametry.

Koaxiální kabel je významný zástupce asymetrických napáječů. Koaxiální kabely mohou být umístěny v blízkosti vodičů se silovým vedením a neovlivní jim ani další vodivé předměty v jejich okolí. Koaxiální kabel se vyrábí ve dvou provedeních 50Ω, který se používá pro svůj malý výkonový útlum pro přenos energie od vysílače k anténě a 75Ω, který se pro svůj nižší napěťový útlum používá pro přivedení energie od antény k přijímači.



Obr. 2.5: Koaxiální kabel, izolace koaxiálních kabelů se obvykle vyrábí z PVC, pro přenosy velice velkých energií se jako izolace může používat i inertní plyn.

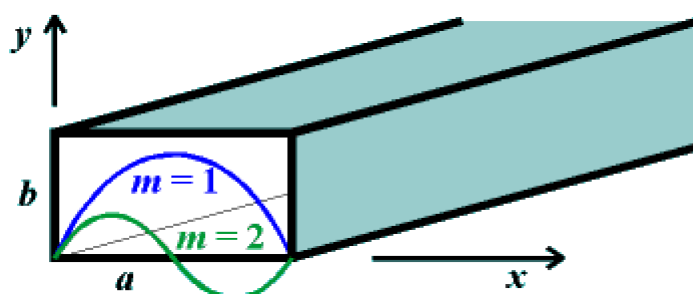
Zástupcem asymetrických napáječů je rovněž mikropásek, vyráběný v tomto provedení



Obr. 2.6: Asymetrický mikropásek, jeho největší uplatnění se naskytá v elektronice na tištěných spojích.

2.4.2 Vlnovod

Vlnovodem většinou rozumíme kovový profil, jehož rozměry jsou srovnatelné s délkou vlny. Druhy vedení, které známe z každodenního života (koaxiální vedení, dvojlinka), jsou jen omezeně použitelné v mikrovlnných kmitočtových pásmech, protože s růstem kmitočtu přenášeného signálu významně rostou ztráty v dielektriku těchto vedení. Proto se na vyšších kmitočtech používají pro přenos signálu velmi často vlnovody. Vnitřní stěny vlnovodu bývají upraveny tak, aby byly minimalizovány ztráty v kovu (obvykle lze stěny vlnovodu pokládat za dokonalý elektrický vodič). Příčný profil vlnovodu má obvykle obdélníkový nebo kruhový tvar. Ve speciálních případech může mít průřez vlnovodu tvar písmene Π nebo H tyto vlnovody jsou širokopásmovější než běžný obdélníkový vlnovod, avšak na druhou stranu přenášejí menší výkon. Impedance je dána geometrickými rozměry vlnovodu. Při spojování vlnovodu je nutné zajistit dokonalou sousost. Energie se šíří uvnitř vlnovodu. Při porušení vlnovodu energie uniká ven. Charakteristická impedance závisí na profilu a geometrických rozměrech vlnovodu.



Obr. 2.7: Vlnovod

3 Impedanční opakovač

Impedanční opakovač je vysokofrekvenční napaječ jehož l_{el} se rovná polovině λ_{el} signálu přenášeného v napaječi.

Následujícím měřením jsem prokazoval platnost teorie opakovače impedance pro různé napaječe rozdílných délek a primárních parametrů. Měření probíhalo vždy následujícím způsobem.

1. Změřením geometrické délky napaječe l_g
2. Zjistit zkracovací koeficient k_{zrk} měřením rezonance měřicím přístrojem GDO a následným lazením rezonované frekvence na spektrálním analyzátoru.
3. Pomocí zkracovacího koeficientu určit λ_{el} a $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,5$
4. Anténím analyzátozem MFJ-269 (příloha D) analyzovat 3 druhy zátěží: činný odpor (18,9 Ω , 27 Ω , 149 Ω), zátěž indukčního charakteru $L=2,6 \mu H$, zátěž kapacitního charakteru $C=17,2 pF$, měření naprázdno a měření nakrátko
5. Vytvoření grafu v Microsoft Exelu
6. V programu SmithV3 nasimulovat průběhy měření
7. Vyhodnotit data

Při měření výše uvedeným měřicím přístrojem, je možné měřit rozsahy od 1,761 MHz do 174,84 MHz. Není tedy možné měřit poměrnou vlnovou délku od nuly do až do začátku kmitočtového rozsahu přístroje v intervalu $<0;x>$. Teto rozsah není měřením možné potvrdit. Můžeme, ale použít faktu, že opakovač impedance se skládá ze dvou čtvrtvlnných transformátorů a chybějící interval nahradit intervalem $<0,5;0,5-x>$.

Cílem měření v podkapitolách 3.2.1, 3.2.2 a 3.2.3 je snaha potvrdit platnost teorie o opakovači impedance. Dále je cílem vyhodnotit jak se mění impedance při změně lazené frekvence, potažmo

vlnové délky v místech, kde se $\frac{\lambda}{\lambda_0} \neq 0,5$

3.1 Transformace impedance

V předchozích kapitolách jsme popsali důležitost impedančního přizpůsobení a jak jeho absenci vznikají v anténách obvodech negativní jevy, jako je zahrívání vysílače vlivem stojatého vlnění, popřípadně odrazení přijatého signálu zpět k anténě. Při transformaci impedance musíme uvažovat konkrétní situace pro konkrétní frekvence, popřípadně jejich n násobky, kdy

$$n > 0 \cap n \in Z \quad (3.1)$$

Nejprve si ukážeme co nám stane při přiložení čtvrtvlnného transformátoru k anténímu obvodu. Princip si pro větší názornost ukážeme jak pomocí geometrického vyjádření, tak vyjádření pomocí Shmitova diagramu. Čtvrtvlnný transformátor pracující pro zvolenou frekvenci f , má délku elektrické vlny λ_{el} . Tuto elektrickou délku vyjádříme ze vztahu:

$$\lambda_{el} = \frac{c}{f} \quad (3.2)$$

Skutečnou délku, neboli geometrickou délku λ_g čtvrtvlnného transformátoru vyjádříme pomocí elektrické délky a zkracovacího činitele k_{zrk}

$$\lambda_g = \lambda_{el} k_{zrk} \quad (3.3)$$

Abychom transformovali charakteristickou impedanci antény Z_A k charakteristické impedanci

Z_{Tx} pomocí čtvrtvlnného transformátoru [2], musí být charakteristická impedance čtvrtvlnného transformátoru Z_T rovna:

$$Z_T = \sqrt{Z_A Z_{Tx}} \quad (3.4)$$

Po převedení rovnice na tvar

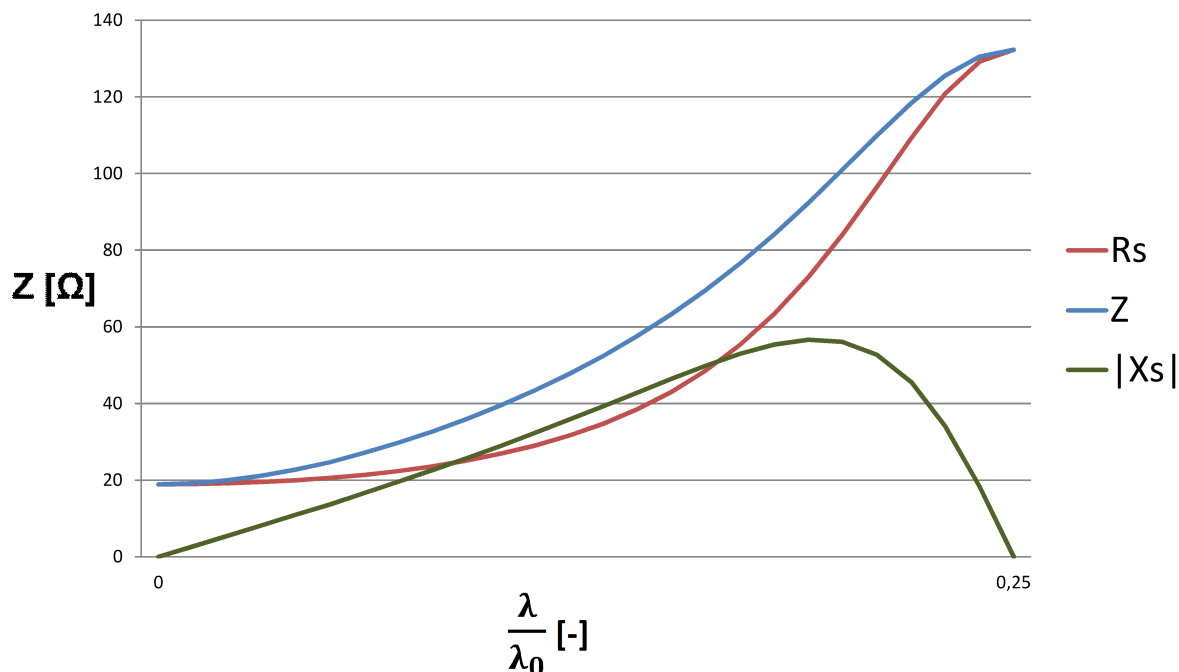
$$Z_A = \frac{Z_T^2}{Z_{Tx}} \quad (3.5)$$

si lépe můžeme představit situaci, kdy máme na zátěž připojený čtvrtvlnný transformátor, který nám danou charakteristickou impedanci transformuje k impedanci Antény Z_A . Následující grafy (obr. 3.1 a obr. 3.2) jsou výsledky simulace v programu SmithV3. To jestli bude hodnota transformované Z_A nižší než Z_{Tx} samozřejmě závisí na použitém čtvrtvlnném transformátoru, respektive na parametrech Z_T . V grafu (obr. 3.1), který uvádím pro názornost je počáteční impedance $Z_{Tx} = 18,9 \Omega$, impedance vedení $Z_L = 50 \Omega$ a konečná impedance $Z_A = 132,275 \Omega$, při $f = 18,562 \text{ MHz}$ a $k_{zrk} = 0,66$

Na jedné straně transformátoru máme charakteristickou impedanci Z_{Tx} a na druhou stranu čtvrtvlnného transformátoru se přenesla impedance Z_A . V grafu (obr. 3.1 a obr. 3.2) můžeme

pozorovat průběh změny impedance Z v závislosti na $\frac{\lambda}{\lambda_0}$. Při transformaci se mění obě

komplexní složky [7] charakteristické impedance, imaginární složka I_m a reálná R_e . Lépe je průběh transformace pozorovat na Smitově diagramu (obr. 3.2), který nám obě tyto složky vyobrazí v jednom společném grafu.



Obr. 3.1: Čtvrtvlnný transformátor. Graf nám ukazuje jak se bude teoreticky měnit hodnota charakteristické impedance při zkracování, nebo naopak při prodlužování napaječe, který je lazený pro konstantní signál 18,562 MHz

Smithův diagram (obr. 3.2) znázorňuje závislost činitele odrazu ρ na charakteristické impedanci zobrazenou v komplexní rovině.

$$\rho = \frac{z + 1}{z - 1} \quad (3.4)$$

kde z je poměrová impedance vyjádřená vztahem

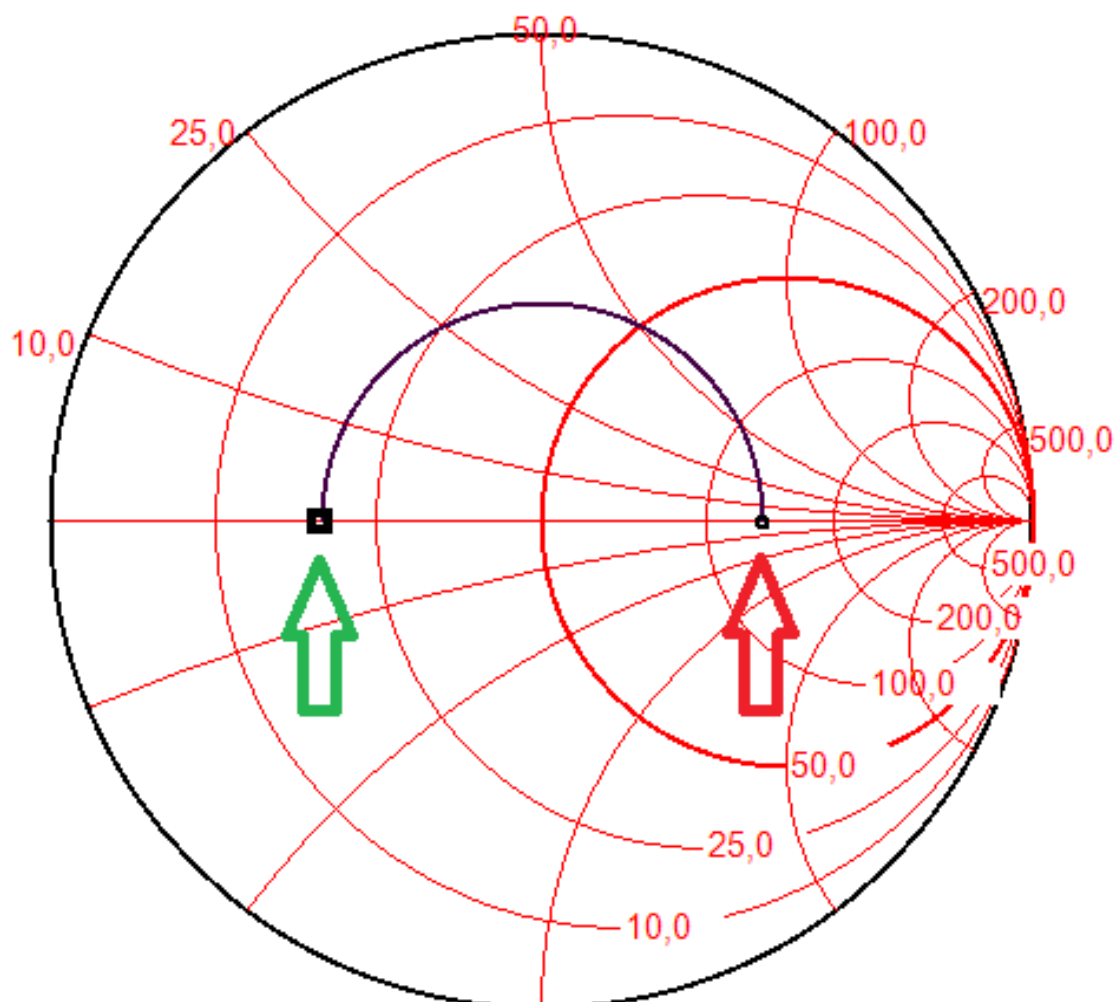
$$z = \frac{Z}{Z_T} \quad (3.5)$$

Z představuje impedanci na začátku vedení tedy Z_A nebo na konci vedení Z_{Tx}

Činitel odrazu ρ je vyjádřený komplexním vektorem, jdoucího ze středu grafu do bodu, který odpovídá příslušné impedanci. Střed grafu tvoří impedance Z_L , která vysokofrekvenční obvod přizpůsobuje k příslušné impedanci. Na Smithově diagramu se pohybujeme po parametrických čarách. Smithův diagram je z vnější strany tvořen kružnicí o poloměru $\rho = 1$. Toto je maximální hodnota činitele odrazu v pasivních zapojeních.[8]

Zelená šipka ve Smithově diagramu (obr. 3.2) označuje počáteční bod transformace Z_{Tx} . Červená šipka znázorněje výslednou impedanci Z_A . Na Smithově diagramu si můžeme nádherně představit jak se kapacitní zátěž dokáže transformovat na zátěž indukční a naopak. Černý půlkruh, po kterém se pohybujeme, jsou hodnoty λ_{el} . Za referenční hodnotu byla zvolena Z_{Tx} , jakožto čistě reálná

hodnota a i když se v průběhu transformace imaginární složka objevuje, výsledná Z_A je opět čistě reálná.



Obr. 3.2: Čtvrtvlnný transformátor zobrazení ve Shmitově diagramu. V tomto diagramu vidíme jak transformovaná impedance postupně mění hodnoty reálné i imaginární složky.

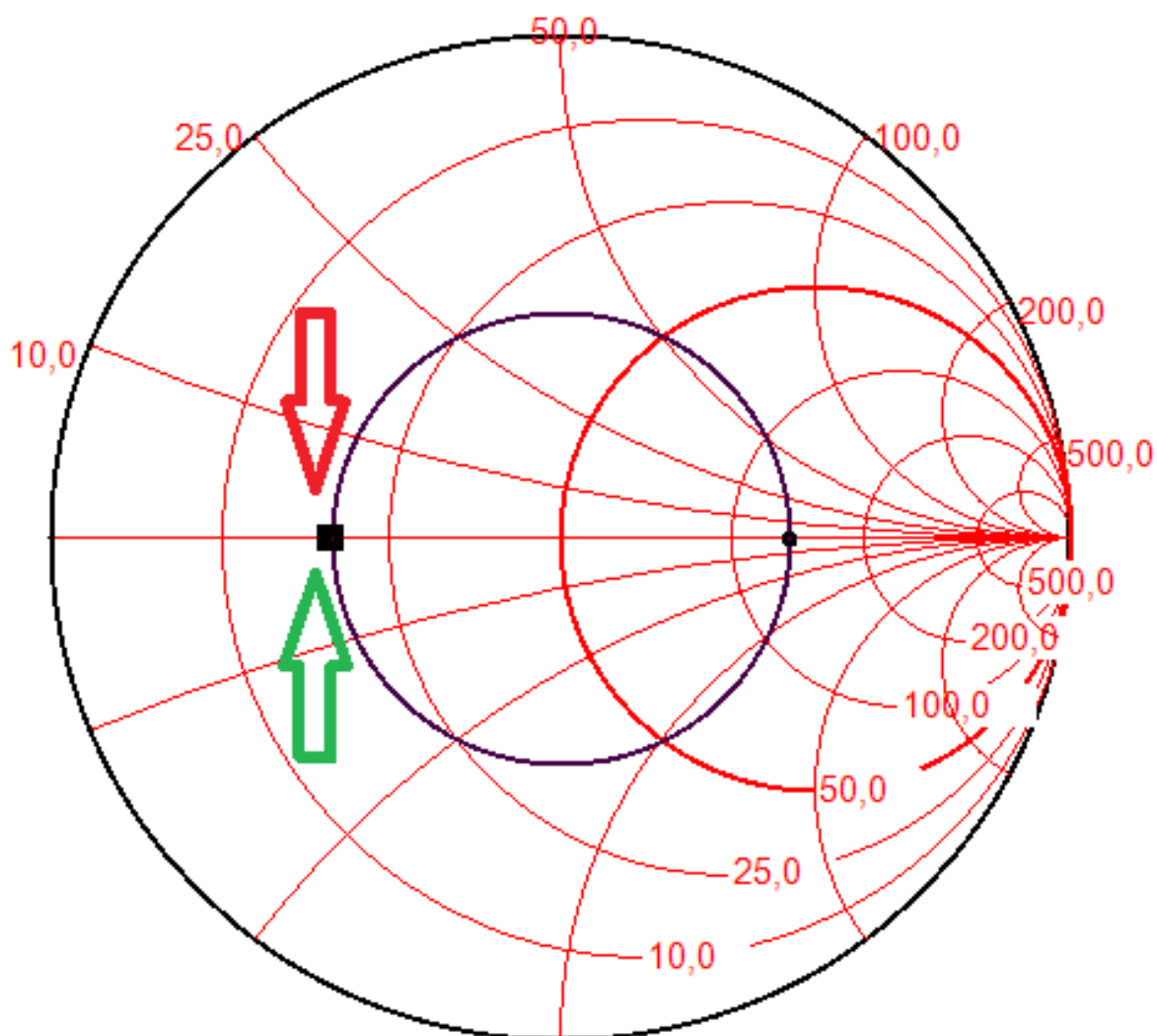
Transformace je samozřejmě obousměrná, z čehož vyplývá že pokud budeme uvažovat začátek vlny s charakteristickou impedancí Z_A , ve vzdálenosti $\frac{\lambda}{\lambda_0} = 0,25$ naměříme charakteristickou impedanci Z_{Tx} .

3.2 Opakování impedance

Né vždy máme možnost připojit anténí svorky s charakteristickou impedancí přímo ke svorkám vysílače a né vždy máme možnost mezi danou anténu a vysílač připojit čtvrtvlnný transformátor takových parametrů, aby provedl požadovanou transformaci. Přizpůsobení impedance vloženým

vedením je sice elegantní a jednoduchá metoda, né vždy se nám ale podaří splnit podmínku (vzorec 2.18), [6] platící pro tuto metodu.

Ve výše uvedených případech je nejsnazším řešením přivedení impedance antény až do naší potřebného místa. Dosáhneme toho pomocí sériového spojení dvou čtvrtvlnných transformátů.



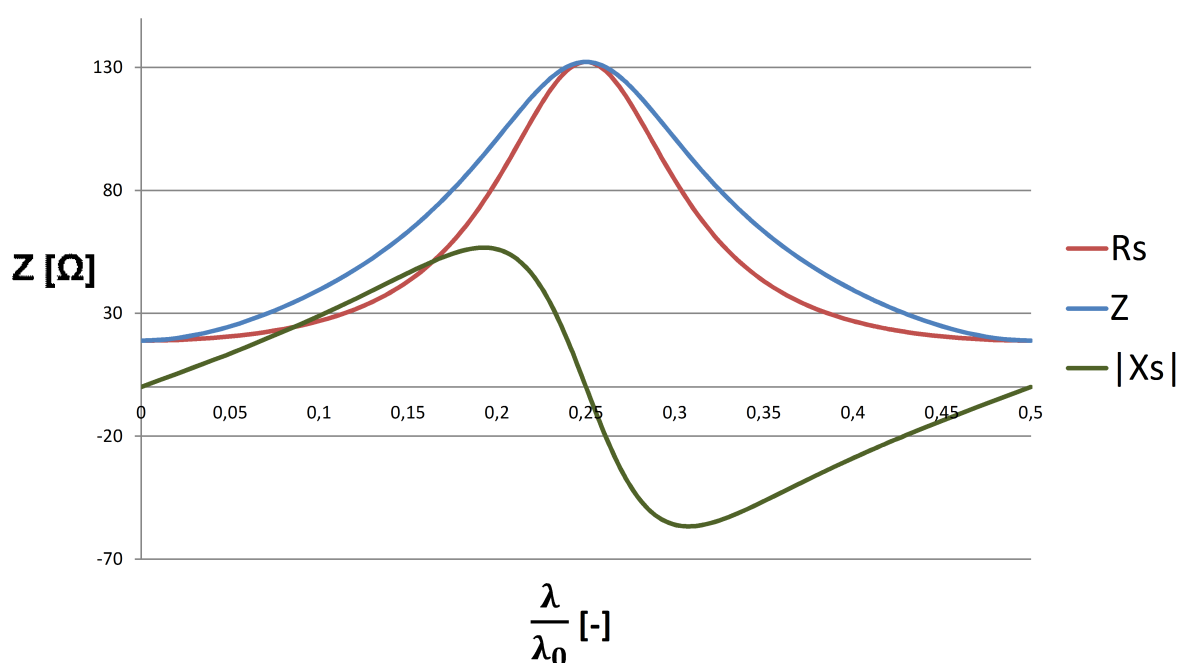
Obr. 3.3: Půl vlnný opakovač zobrazení ve Shmitově diagramu. V tomto diagramu vidíme jak transformovaná impedance postupně mění hodnoty reálné i imaginární složky. Černý kruh, po kterém se pohybujeme, jsou hodnoty λ_{el} . V průběhu transformace se mění činná i jaková složka, až nakonec zůstane původní čistě reálná hodnota

Pokud tedy zapojíme dva anténí napaječe, nebo jejich sudé násobky elektrické délky $\frac{\lambda}{\lambda_0} = 0,25$ do

série, vznikne nám napaječ elektrické délky $\frac{\lambda}{\lambda_0} = 0,5$, který má tu vlastnost, že v první polovině své elektrické délky transformuje charakteristickou impedanci Z_A na Z_{Tx} , v polovině druhé

transformuje Z_{Tx} zpět na Z_A a tím charakteristickou impedanci Z_A opakuje. Odtud pochází jeho lidovější název Impedanční opakovač.

Půlplný opakovač má tedy tu vlastnost, že nám přenáší hodnotu Z_A , označeno zelenou šipkou, ze vstupu na hodnotu Z_A , označeno modrou šipkou, na výstup. Výstup půlplného opakovače poté můžeme zapojit buď na svorky přizpůsobovacího článku, kde impedanci přizpůsobíme pro zbytek obvodu, nebo na vstup vysílače se stejnou charakteristickou impedancí. Postupná transformace jednotlivých složek impedance je zachycena grafem (Obr. 3.4). Reálná i imaginární část se nejprve transformují, stejně jako u čtvrtvlnného transformátoru, a pak se zpátky transformují na původní hodnoty.

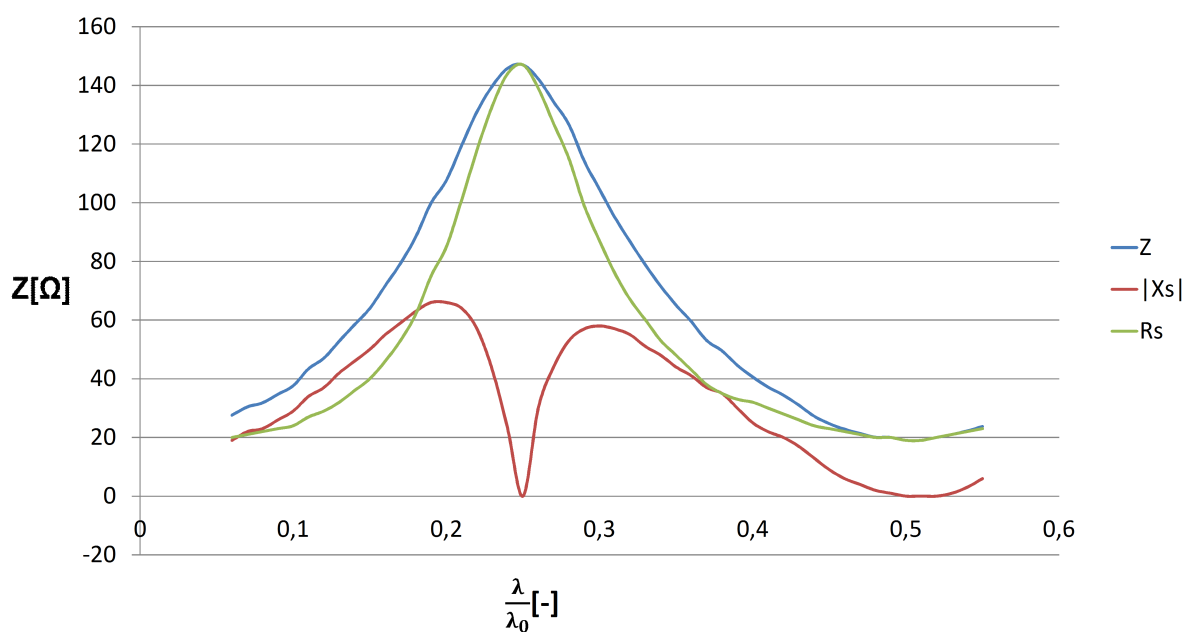


Obr. 3.4: Půlplný opakovač odsimulovaný pomocí programu SmithV3 pro simulaci byla vybrána reálná zátěž 18,9 ohm. V grafu můžeme pozorovat změnu indukční složky na kapacitní, i rezonanční body.

Stejně (fyzické) vedení se pro vyšší harmonické $\frac{\lambda}{\lambda_0} = 0,5x$, kde $x \in \mathbb{N} \wedge x > 0$, může uplatnit také jako opakovač impedance.

3.2.1 Asymetrický napaječ s charakteristickou impedancí 50 Ω

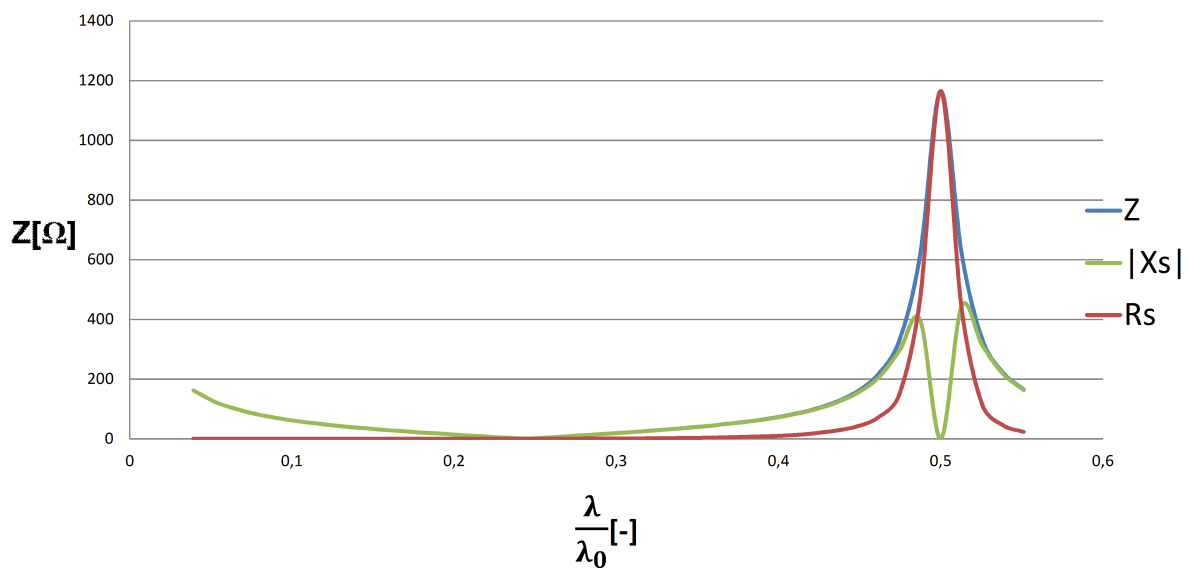
Jedná se o asymetrický napaječ s výrobním označením RG 58 c/u a s charakteristickou impedancí [9] $Z = 50 \pm 2 \Omega$, měrnou kapacitou $C = 100,7 \text{ pF/m}$, zkracovacím činitelem $k = 0,66$, geometrická délka $l_g = 5,09 \text{ m}$, měření bylo prováděno s činou zátěží 18,9 ohm, kapacitní zátěží 17,2 pF, indukční zátěží 2,6 μH



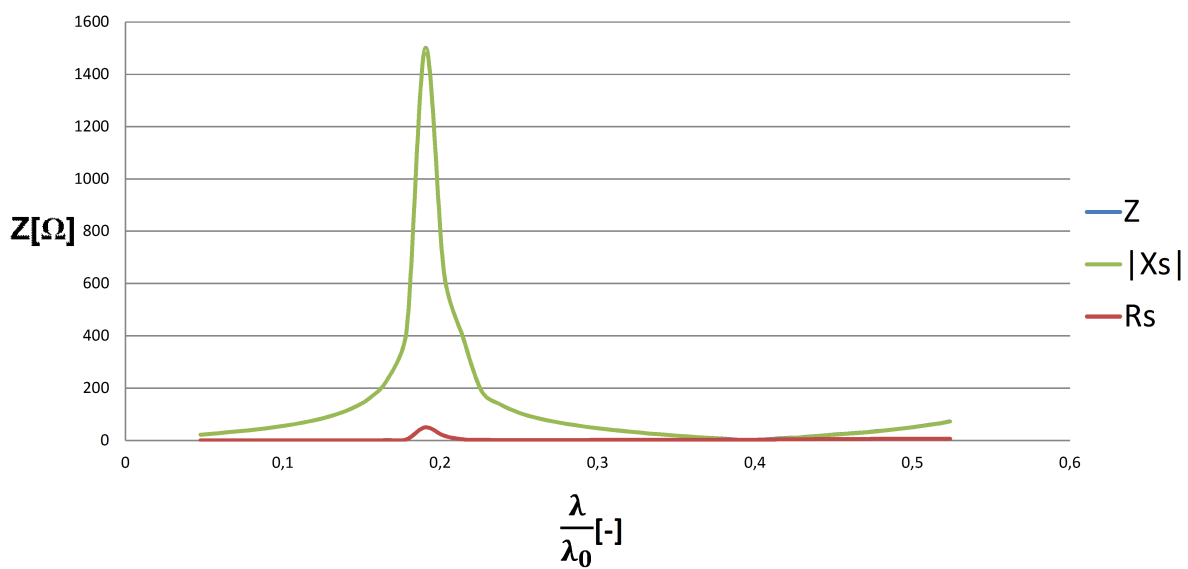
Obr. 3.5: RG 58 ve funkci impedančního opakovače s koncovou zátěží $Z = (18,9 + j0) \Omega$.

Napaječ RG má velice dobré prenosové vlastnosti, ve vzdálenosti $\frac{\lambda_{el}}{4}$ je jalová složka

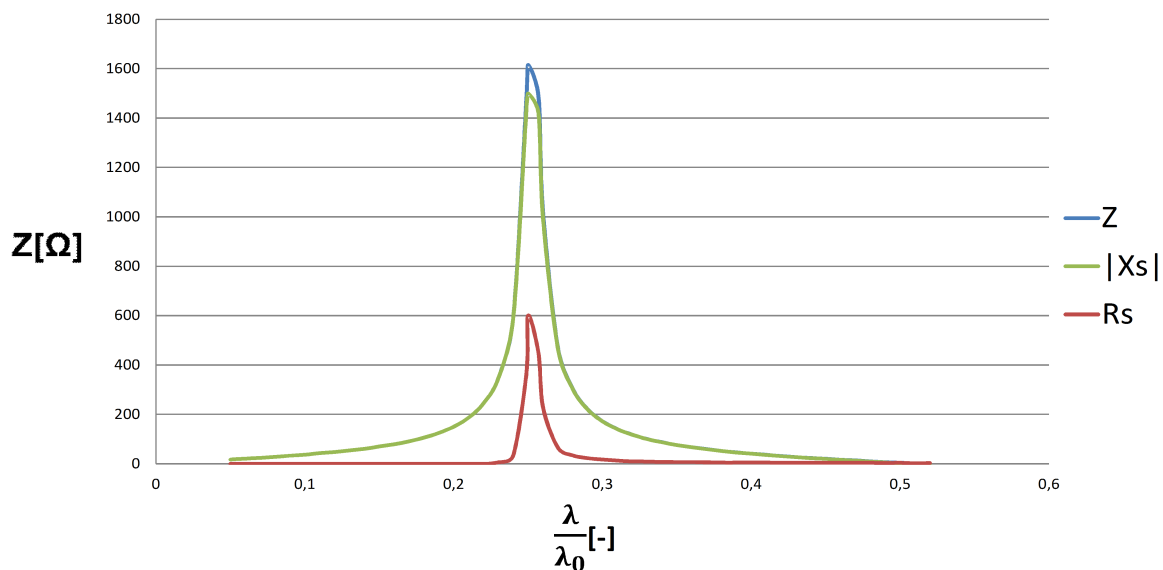
rovna 0 a transformovaná zátěž je čistě reálná. V místě $\frac{\lambda_{el}}{2}$ je také jalová složka rovna 0 a reálná zátěž dosahuje původních hodnot.



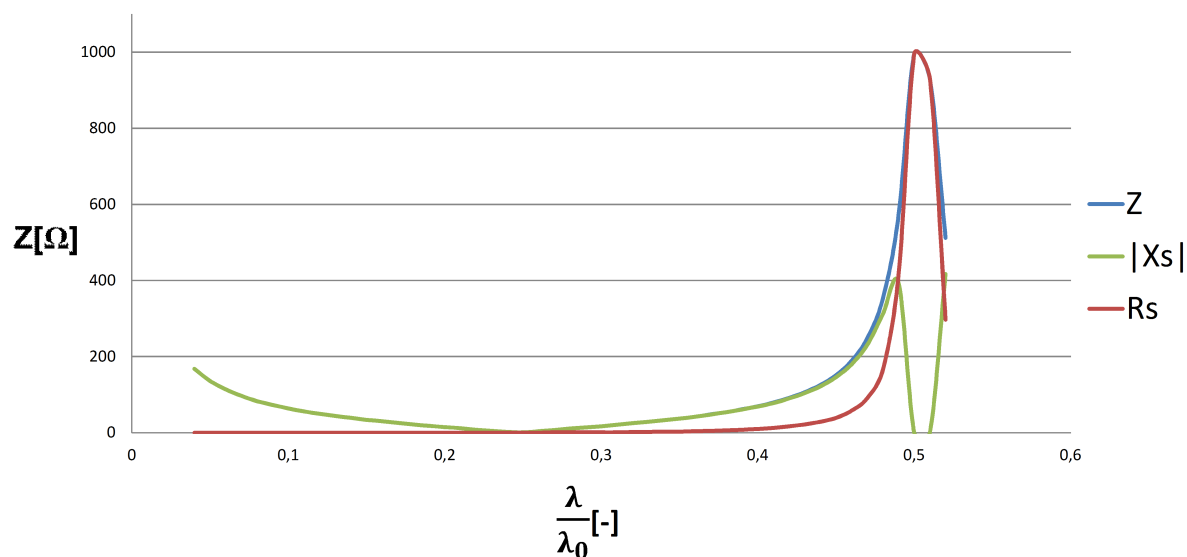
Obr. 3.6: RG 58 ve funkci impedančního opakováče s koncovou zátěží $C=17,2\text{pF}$



Obr. 3.7: RG 58 ve funkci impedančního opakováče s koncovou zátěží $L=2,6\mu\text{H}$



Obr. 3.8: RG 58 ve funkci impedančního opakovače se zkratovaným koncem

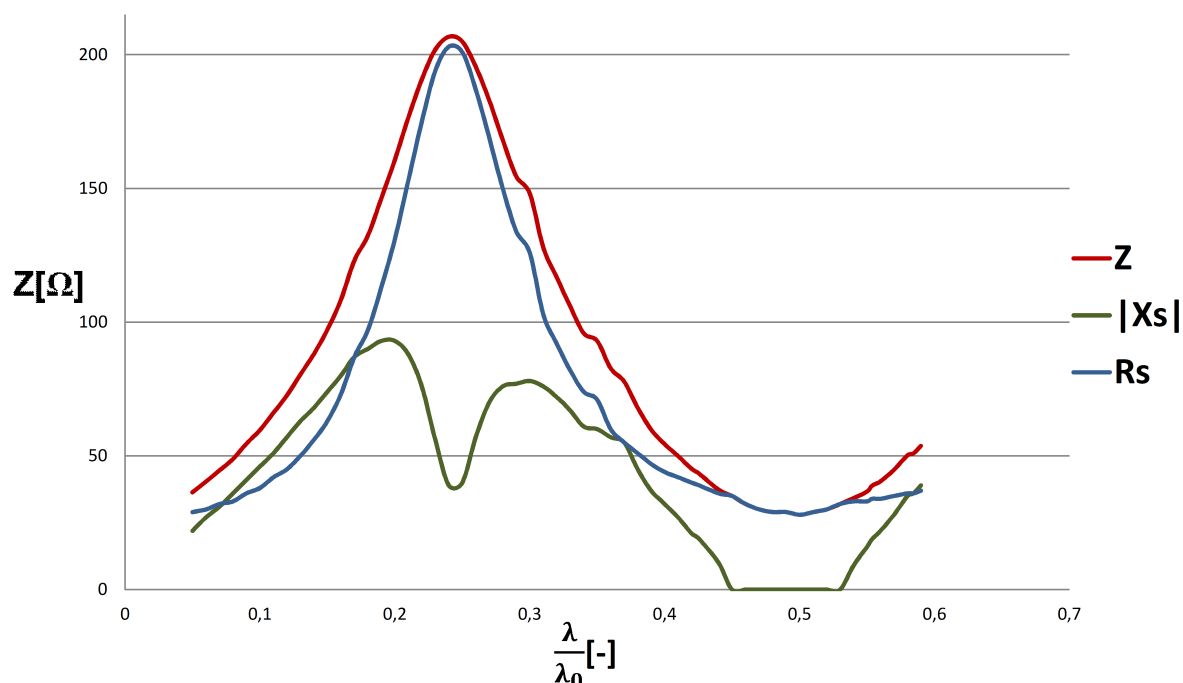


Obr. 3.9: RG 58 ve funkci impedančního opakovače s otevřeným koncem

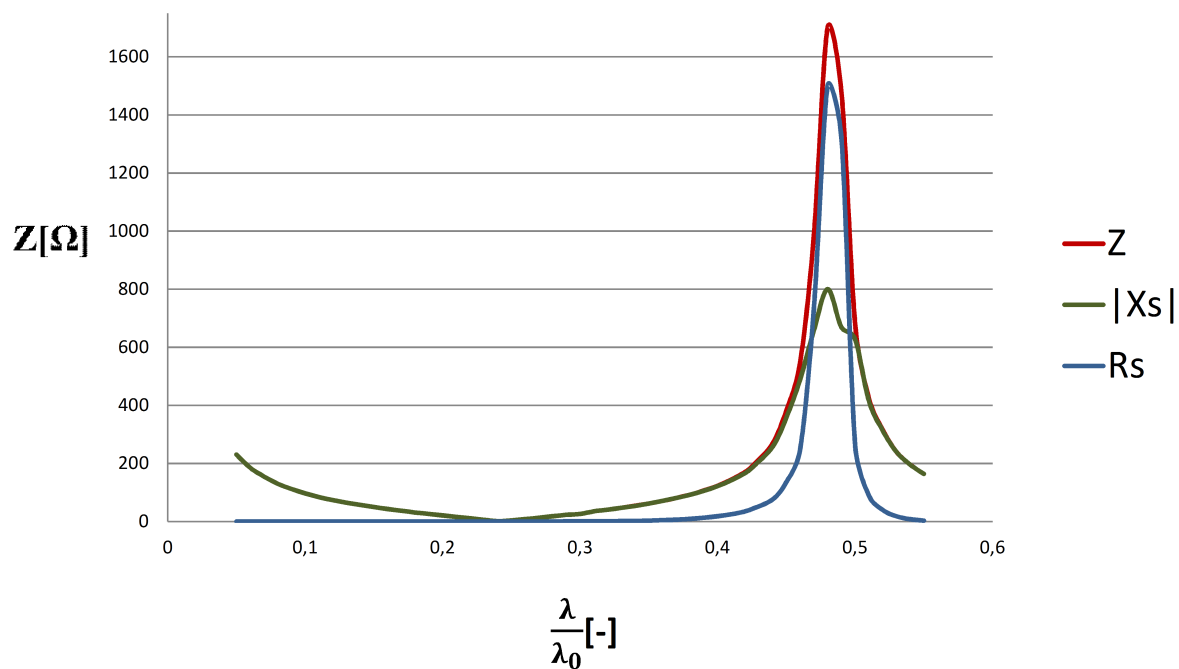
Napáječ Rg 58 má transformační vlastnosti, jenž odpovídají teoretickému rozboru (Obr. 3.5). V poměrné čtvrtlně i půlvlně dochází k rezonanci a v místě půlvlny dochází k opakování impedance zátěže a to jak činné tak i jalové ,cívka + kondenzátor.

3.2.2 Asymetrický napaječ s charakteristickou impedancí $75\ \Omega$

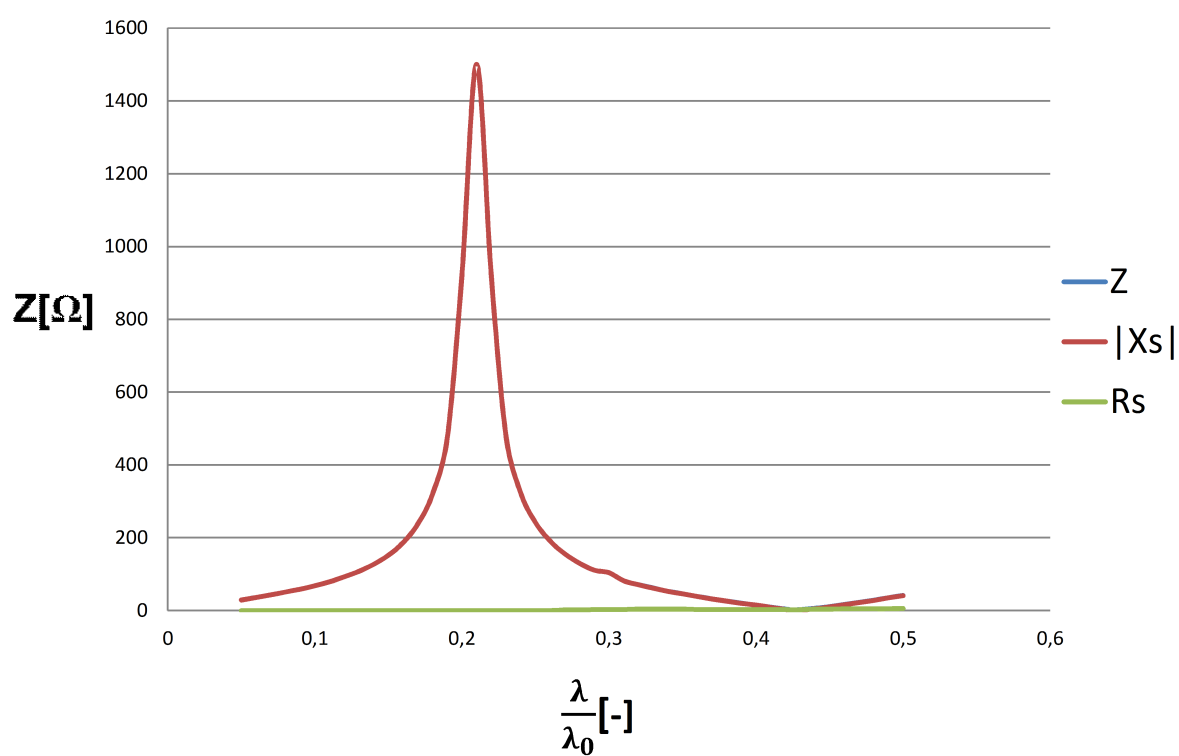
Jedná se o koaxiální kabel (Příloha B) neznámého výrobce s charakteristickou impedancí $Z = 75\ \Omega$, geometrickou délkou $l_g = 5,09\ m$, další parametry jsou neznámé. Tento koaxiální kabel se používal pro příjem televizního vysílání, respektive pro přivádění signálu z antény k přijímači. Charakteristická impedance byla ověřena experimentálně. Na konec napaječe jsem umístil zátěž $Z = 27\ \Omega$ a na frekvenci čtvrtlného transformátoru jsem zaznamenal hodnotu $Z = 302,65\ \Omega$. Z výše uvedeného vzorce ϵ jsem vypočítal charakteristickou impedanci koaxiálního vedení $Z_T = 75,631\ \Omega$ frekvence, při které se z napaječe stává půlvlnný opakovač, činí 18,952 Mhz



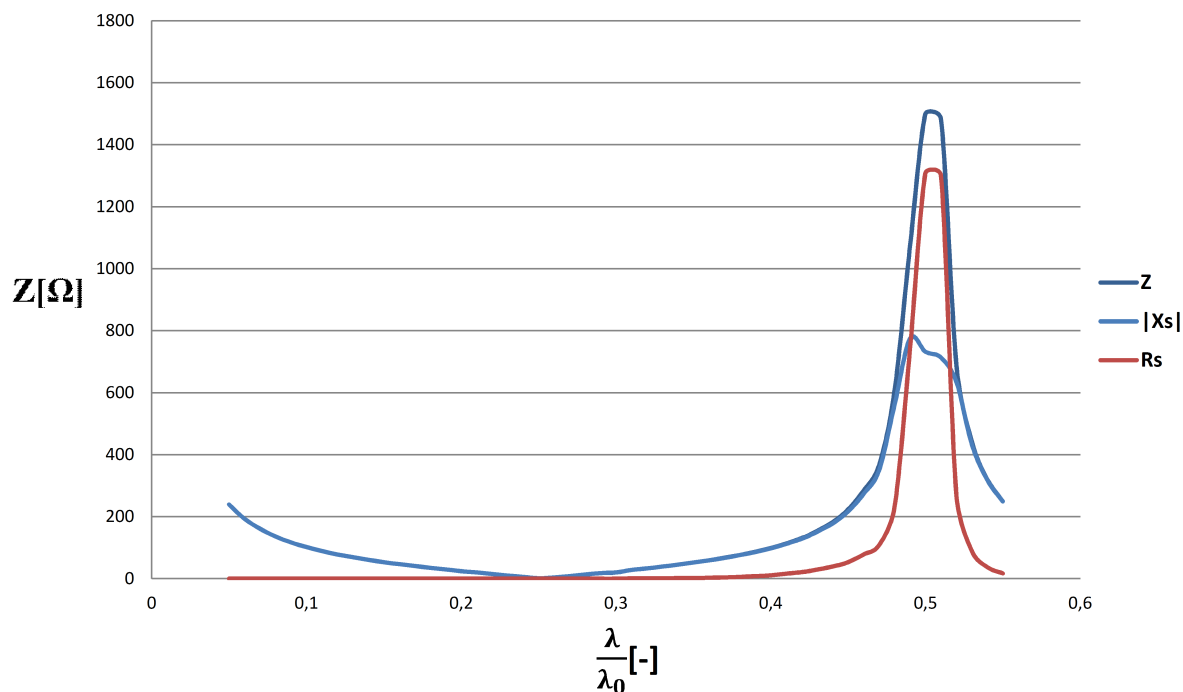
Obr. 3.10: Koaxiální kabel ve funkci impedančního opakovače se zátěží $Z = (27 + j0)\ \Omega$. V místě čtvrtvlny nedochází k rezonanci jako v případě ideálního napaječe Obr. 3.4. Naproti tomu v místě poměrně půlvlny dochází k rezonanci a opakování čině zátěže. Naměřené hodnoty Z se v místě poměrně půlvlny neliší od teoreticky spočítaných.



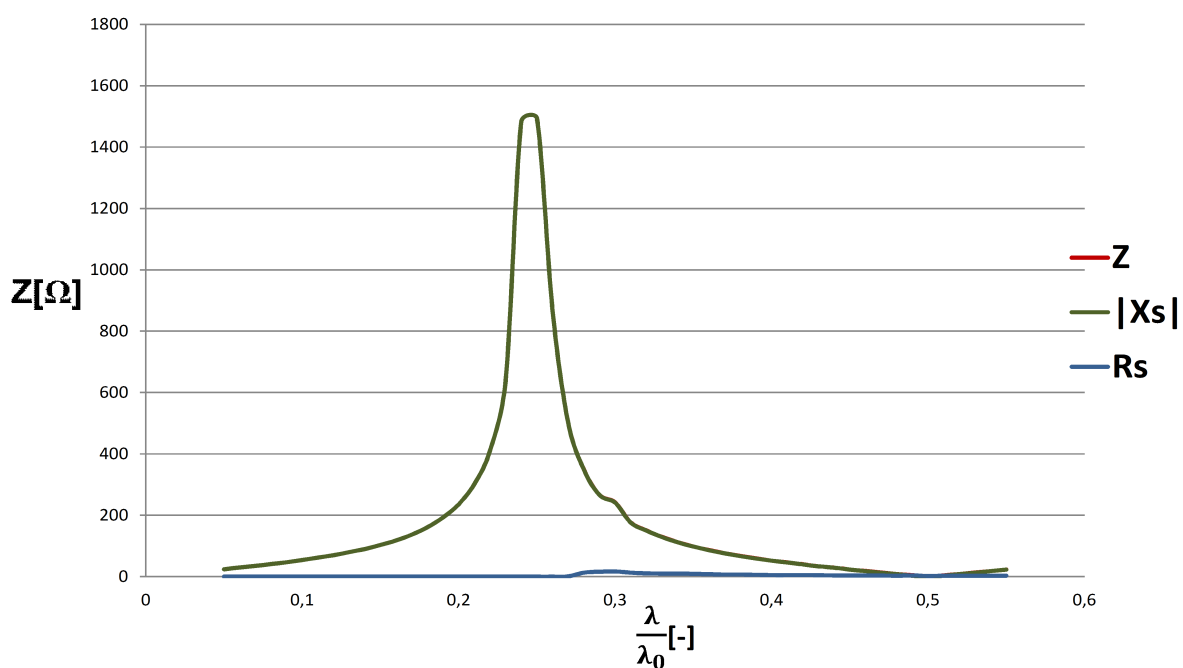
Obr. 3.11: Koaxiální kabel ve funkci impedančního opakovače s kapacitní zátěží $C = 17,2 \text{ pF}$



Obr. 3.12: Koaxiální kabel ve funkci impedančního opakovače s indukční zátěží $L = 2,6 \text{ }\mu\text{H}$



Obr. 3.13: Koaxiální kabel ve funkci impedančního opakovače s otevřeným koncem

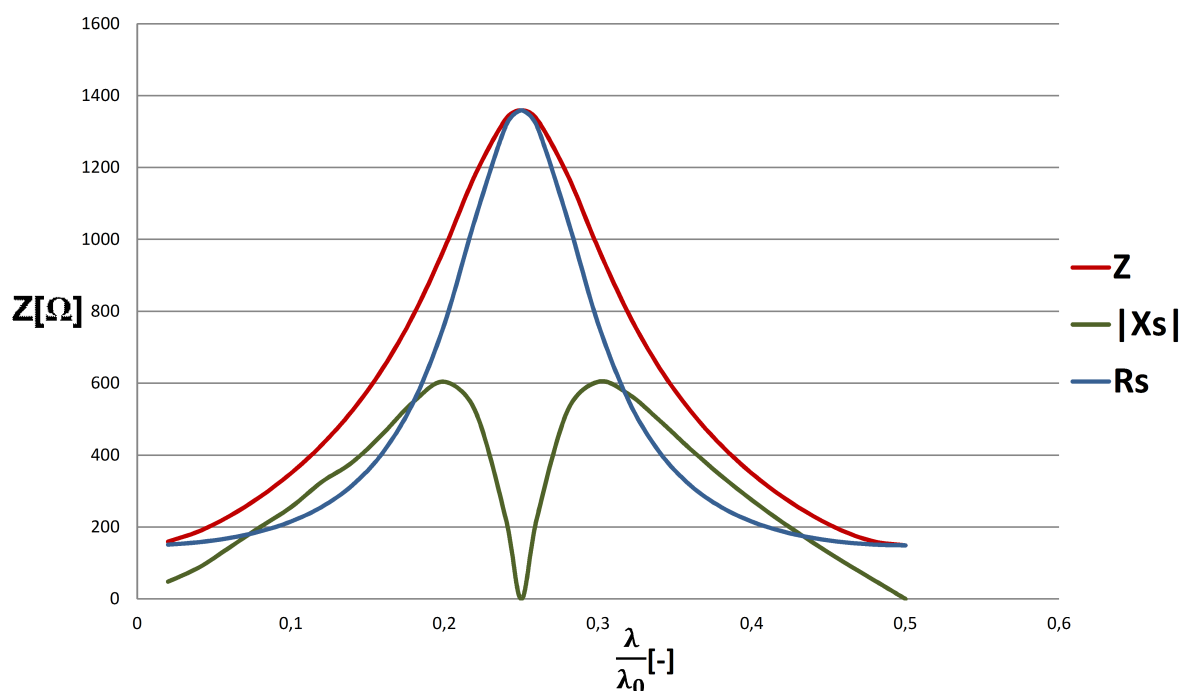


Obr. 3.14: Koaxiální kabel ve funkci impedančního opakovače se zkratovaným koncem

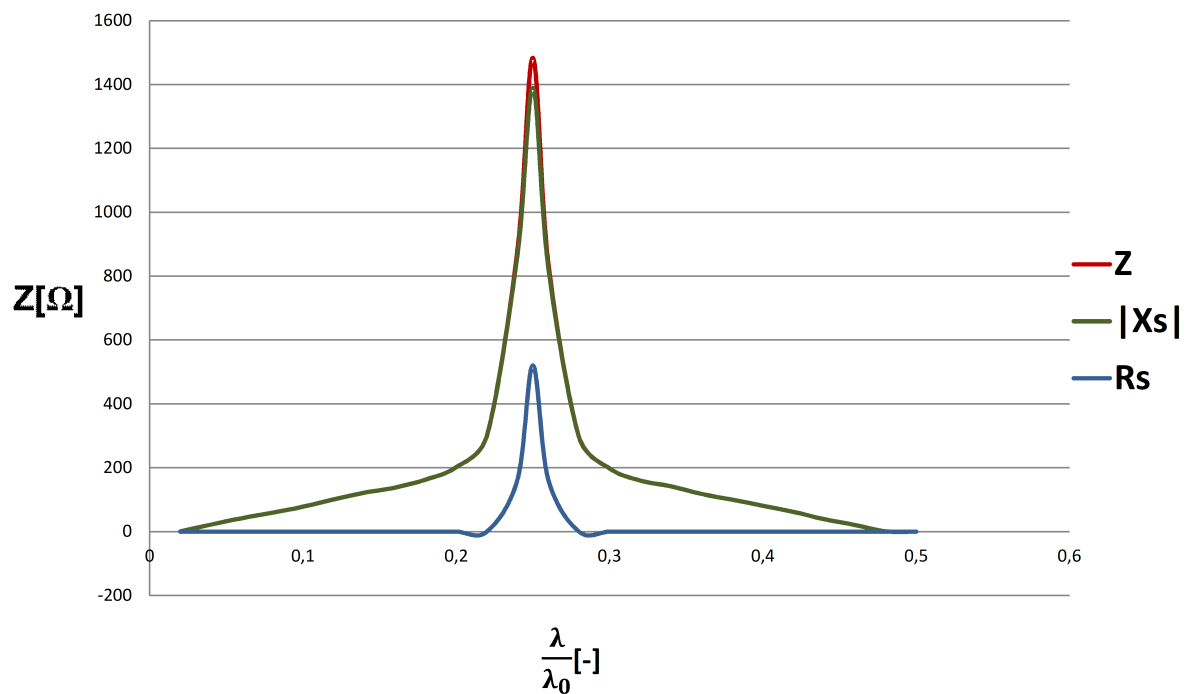
Měřený koaxiální kabel nemá transformační vlastnosti, jenž odpovídají teoretickému rozboru. V místě poměrné půlvlny sice dochází k opakování impedance zátěže, ale v místě čtvrtvlny i půlvlny nedochází k rezonanci jalové složky. Toto může být způsobeno např. porušením dielektrika nebo porušením vzdáleností mezi vodiči.

3.2.3 Symetrický napaječ s charakteristickou impedancí 450 Ω

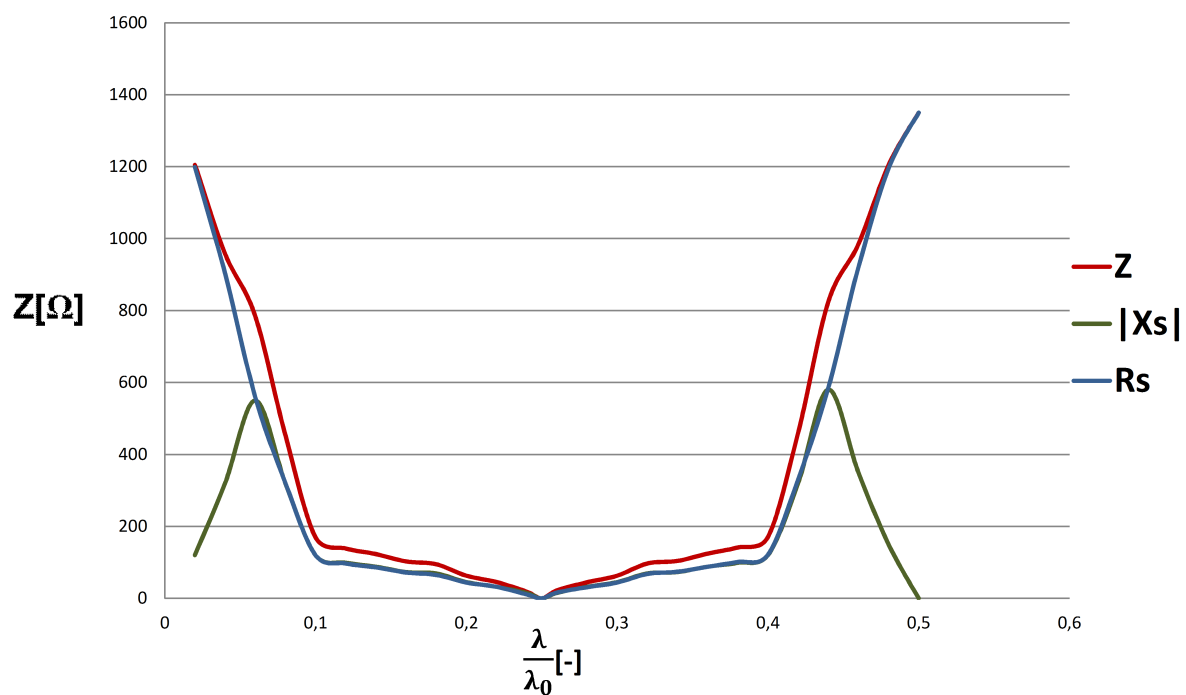
Jedná se o symetrické Vf vedení (Příloha C) vyrobeného v USA s charakteristickou imedancí $Z=450\Omega$, geometrickou délkou $l_g=1\text{m}$. Zkracovací koeficient byl měřen pomocí měřicího přístroje GDO a spektrálního analyzátoru. Pro měření symetrické dvoulinky bylo zapotřebí symetrizace pomocí balunu. Balun je transformátor, který transformuje vyváženou (dvoulinka) s nevyváženou (koaxialní kabel)[11].



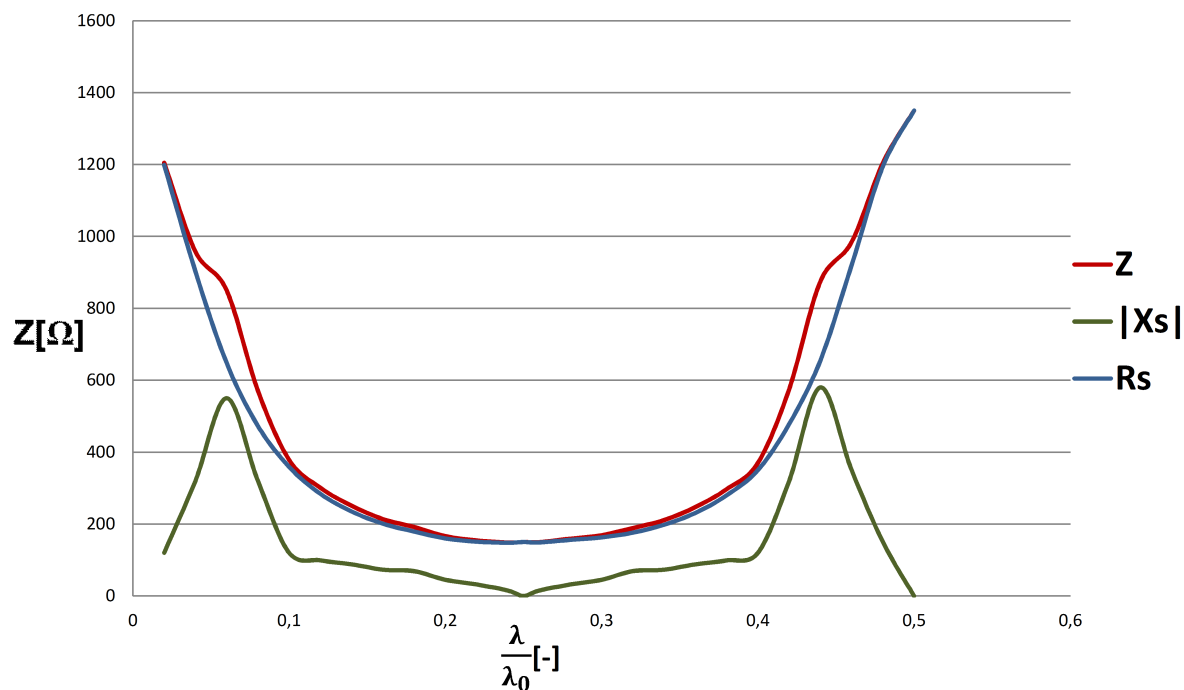
Obr. 3.15: Dvoulinka ve funkci impedančního opakovače s komcovou zátěží $Z=(149+j0)\Omega$. Z měřených Vf napaječů byla právě symetrická dvoulinka nejbližší k ideálnímu stavu. V místě poměrné čtvrtlny i půlvlny pocházelo k rezonancím jalové složky a v místě půlvlny se hodnota zátěže opakovala



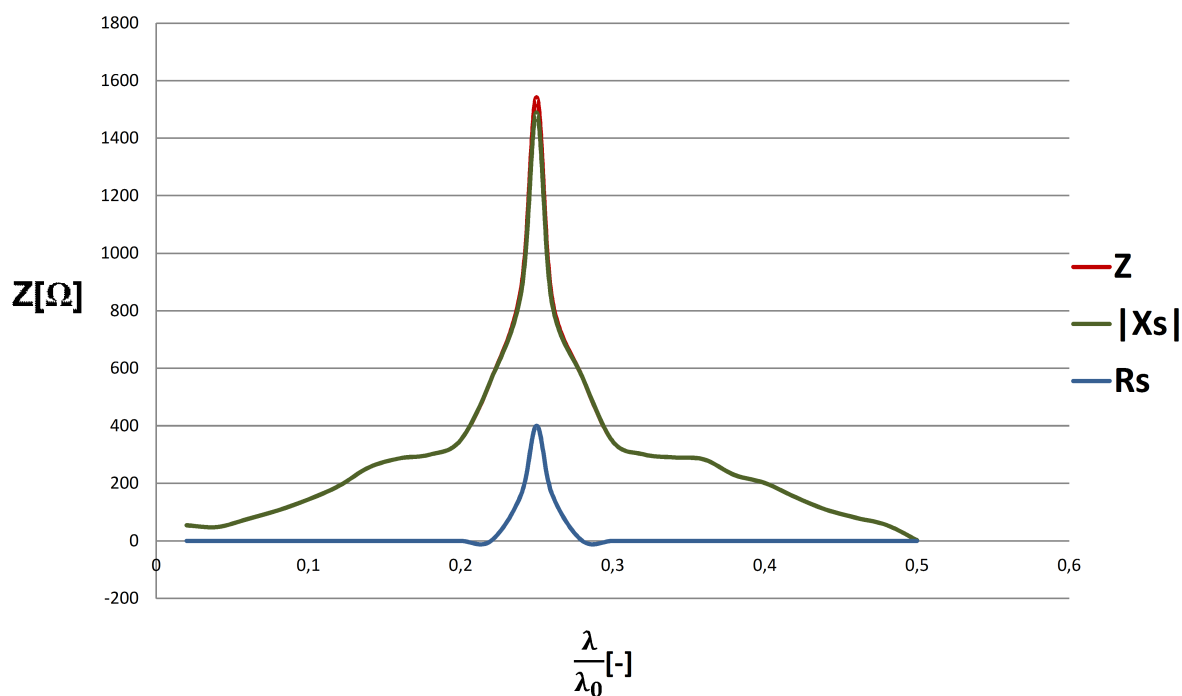
Obr. 3.16: Dvoulinka ve funkci impedančního opakovače s indukční zátěží $L=2,6\mu\text{H}$



Obr. 3.17: Dvoulinka ve funkci impedančního opakovače s kapacitní zátěží $17,2 \text{ pF}$



Obr. 3.18: Dvoulinka ve funkci impedančního opakováče s otevřeným koncem

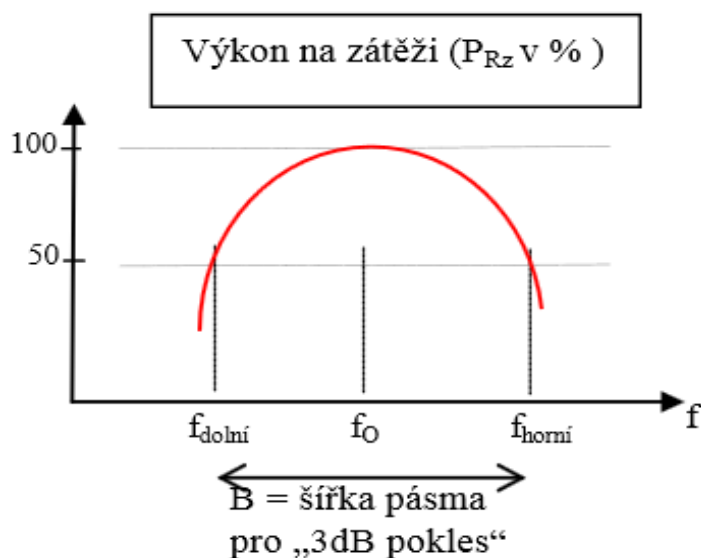


Obr. 3.19: Dvoulinka ve funkci impedančního opakováče se zkratovaným koncem

Dvoulinka vykázala největší přesnost při porovnání se simulovanými hodnotami. Byla ovšem náchylná na měření v blízkosti kovových předmětů, jako je ústřední topení, reproduktor PC soustavy. Náchylná byla také na polohu vodičů při níž se měřilo, nastojato vs. nalezato.

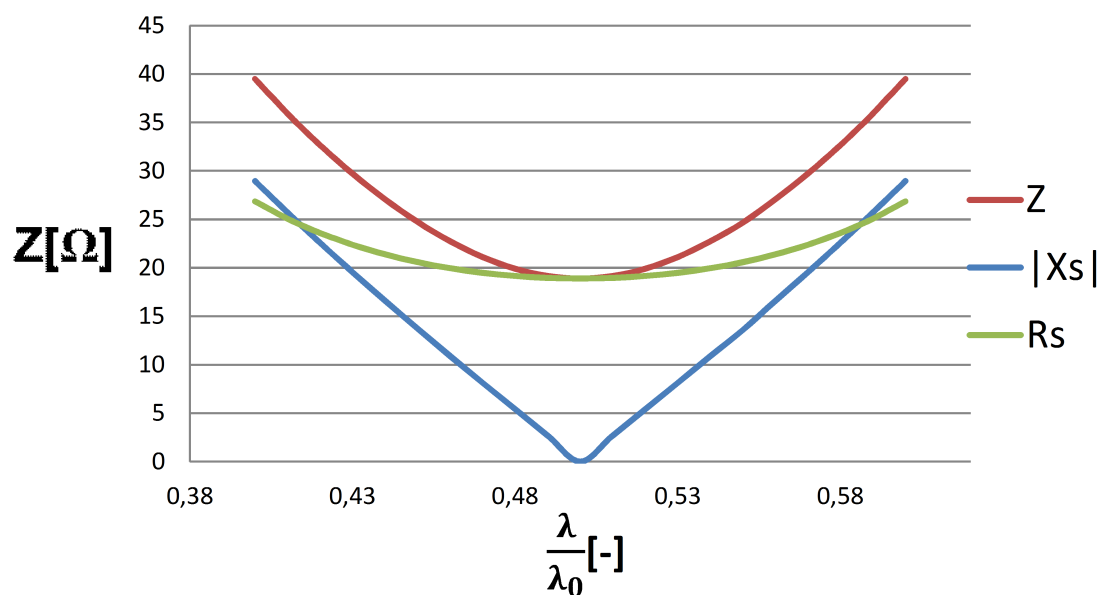
3.3 Impedance v závislosti na frekvenci

Impedanční Opakovač má svou ideální pracovní oblast v místě, kde je jeho poměrná vlnová délka $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,5$, nebo její násobek $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,5x$, kde $x \in \mathbb{N} \wedge x > 0$. Pro měnící se frekvence se sice mění délka vlny, pevně je však daná fyzická délka vysokofrekvenčního napaječe. V místě, kde se $\frac{\lambda}{\lambda_0} \neq 0,5x$, kde $x \in \mathbb{N} \wedge x > 0$, dochází ke transformaci impedance, stejně jako u čtvrtvlnného transformátoru (viz. Obr. 3.1). Změnou frekvence tudíž dochází ke změně impedance, změna impedance má za následek impedance nepříspůsobení a to má za následek vznik stojatého vlnění. Bylo proto dohodou stanoveno, že hraniční kmitočty pracovního pásma budou takové, na nichž výkon

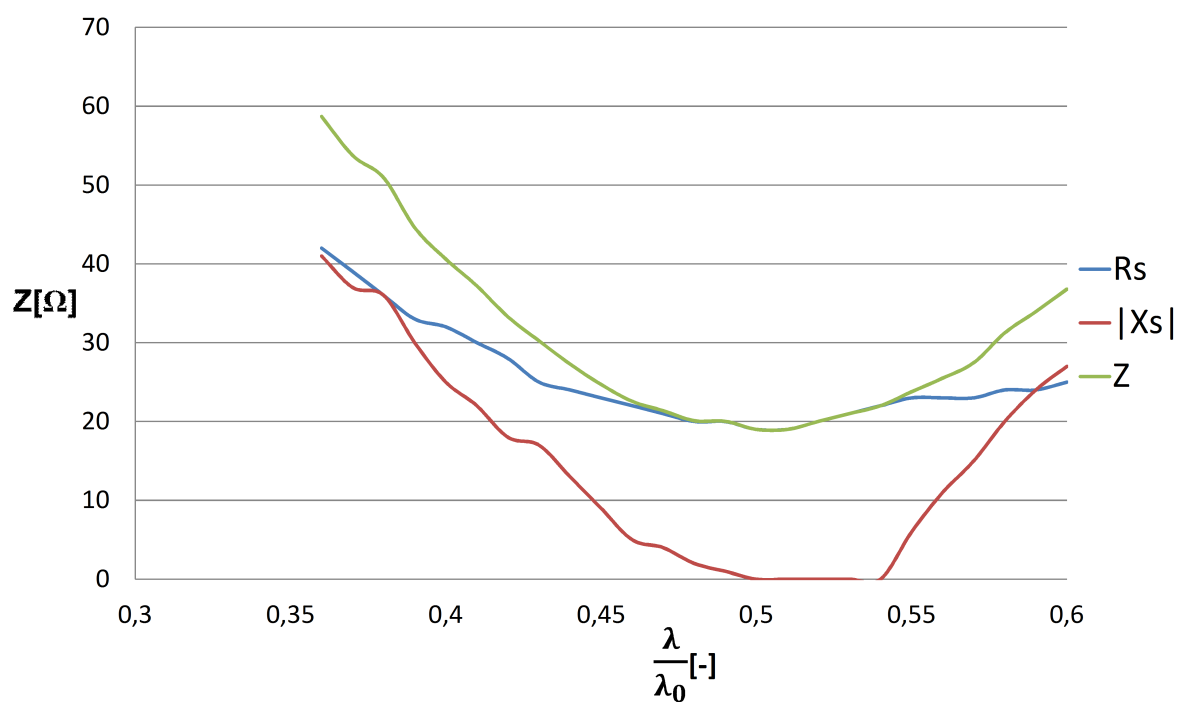


Obr. 3.20: Pracovní pásmo, zdroj: Josef Novák
na činné zátěži klesne o 50% z maximální hodnoty[9] obr. 3.20.

Parametrem určujícím mezní kmitočty je rovnost absolutních hodnot činného a jalového odporu $|R|=|X|$. Následující grav Obr. 3.21 je výsledkem simulace v programu SmithV3 pro $Z_L=50\Omega$ $Z_A=(18,9+j0)\Omega$

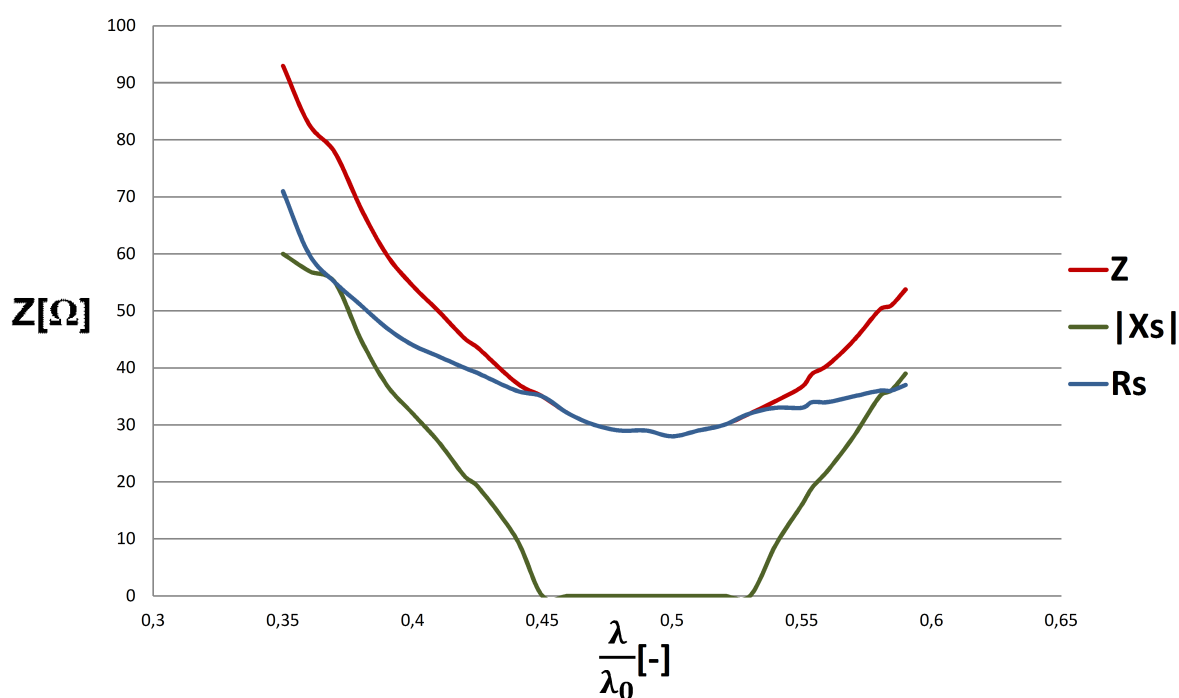


Obr. 3.21: Pracovní pásmo ideálního napaječe s koncovou zátěží $Z=(18+0j)\Omega$ simulovaného v programu SmithV3. Graf je vzorkován s krokem $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,01$



Obr. 3.22: Pracovní pásmo napaječe RG58 s koncovou zátěží $Z=(18+0j)\Omega$, mezní hodnoty pracovního pásma určují body rovnosti $|X_s|$ a R_s

Při nasimulovaném opakovači impedance, napaječe RG 58 (Obr. 3.21) s výše uvedenými parametry, jsme jako mezní body určili hodnoty $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,4141$ a $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,5859$. Při kontrolním měření (Obr. 3.22), byly mezní frekvence zjištěny v hodnotách $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,38$ a $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,59$

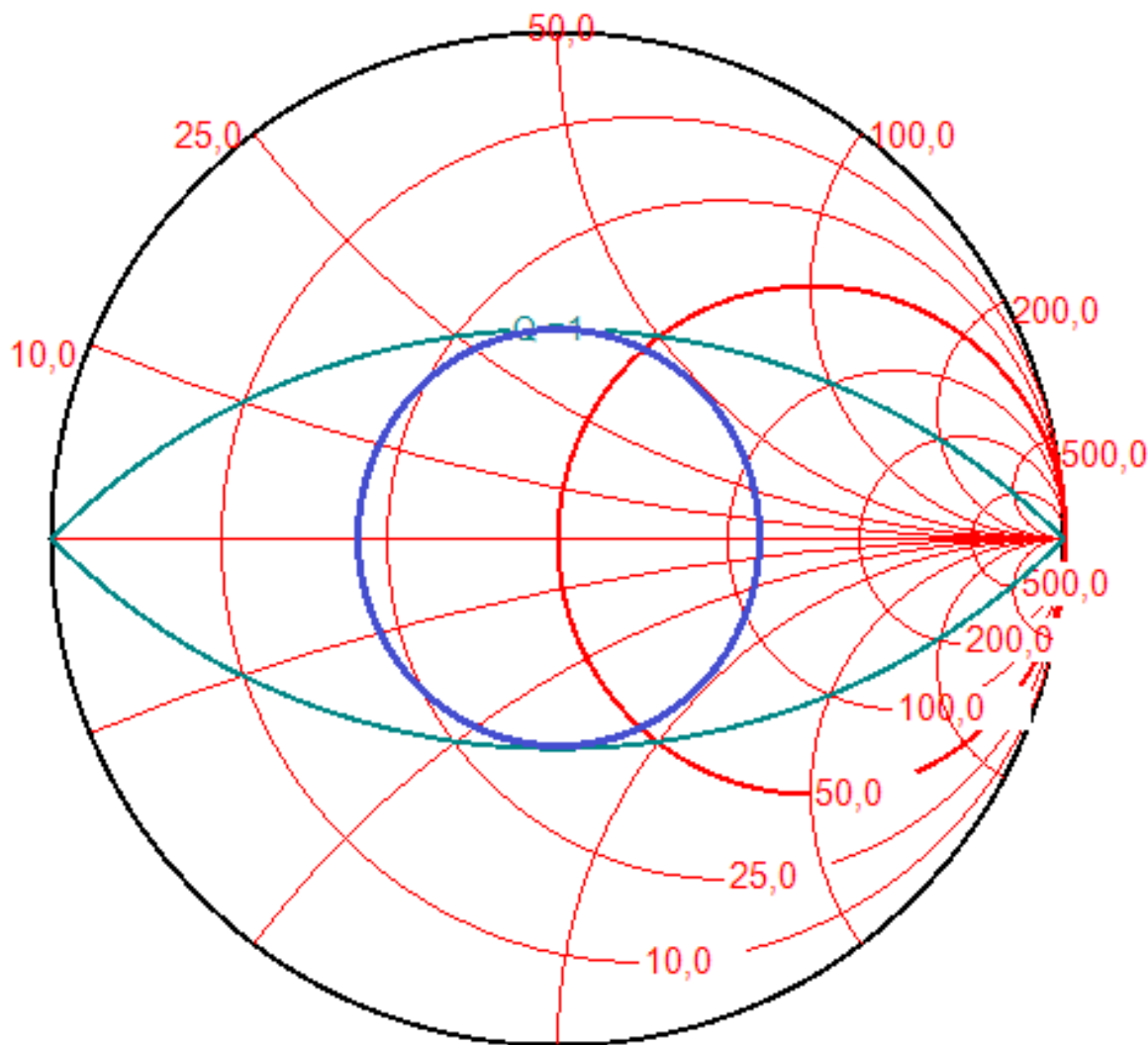


Obr. 3.23: Pracovní pásmo koaxiálního napaječe s koncovou zátěží $Z=(27+0j)\Omega$. Stejně jako na Obr. 3.22. se hodnoty činné a jalové složky neprotnulý v obou dvou mezních bodech, nýbrž v bodě $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,37$ pouze dosáhly rovnosti

Při nasimulování koaxiálního napaječe, jsme jako mezní body určili hodnoty $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,4215$ a $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,5785$. Při kontrolním měření, byly mezní frekvence zjištěny v hodnotách $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,37$ a $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,584$

Šířka pracovního pásma B (Obr. 3.20) se mění podle poměru impedance zátěže k impedanci opakovače. Pro zátěž ryze činného charakteru platí, že čím menší bude rozdíl mezi Z_{Tx} a Z_T , tím větší bude šířka pásma. Bude-li vzdálenost mezi těmito zátěžemi dostatečně malá, nastává mezní případ (Obr. 3.24), kdy se křivka reálné složky a jalové složky pro měnící se frekvenci stanou pouze tečnami. Tento dotek nastane v bodech $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,25$ a $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,75$, což jsou liché násobky

čtvrtvlnného opakovače. Pro každý menší rozdíl impedancí Z_{Tx} a Z_T lze prohlásit impedanční opakovač za širokopásmový. Vyobrazením ve smithovém diagramu dostaneme následující graf.

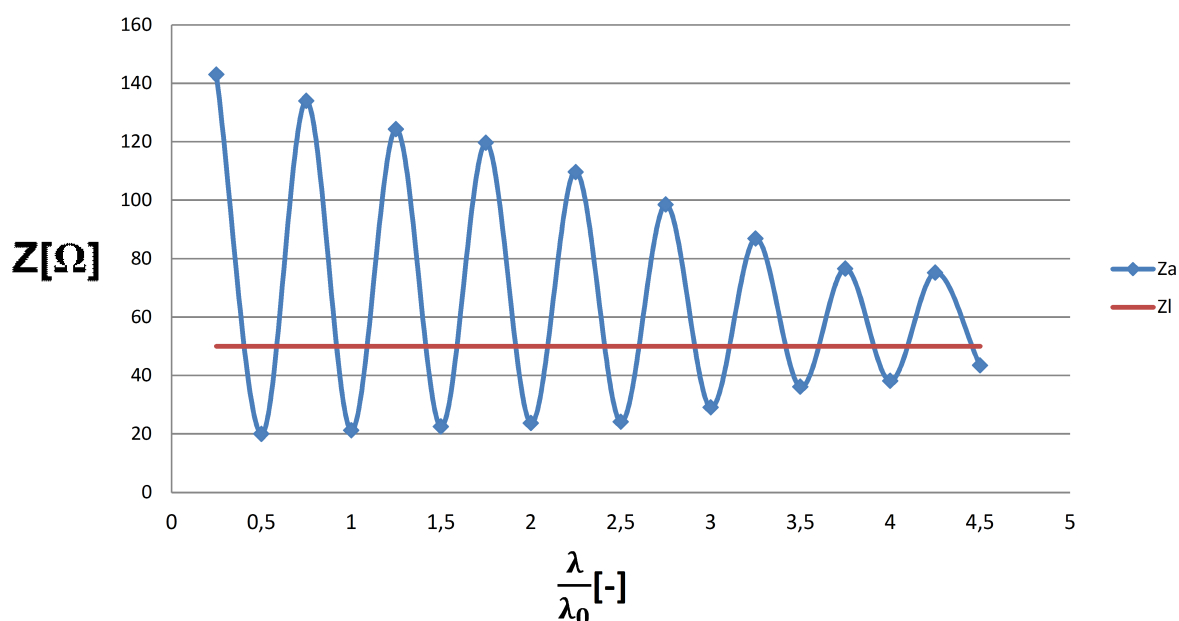


Obr. 3.24: Širokopásmový napaječ, mezní případ

Na Obr. 3.24 vidíme transformaci impedance Opakovače impedance, který můžeme prohlásit za Širokopásmový napaječ,. Střed grafu tvoří opět impedance vedení a modrá kružnice nám znázornuje transformaci impedance. Tyrkysová křivka Q nám označuje body, ve kterých je poměr $\frac{X}{R}=1$. Pokud bude $Q>1$, neboli bude sečnou impedanční křivky, opakovač impedance úzkopásmový. Pokud ale bude $Q\leq 1$, neboli bude sečnou impedanční křivky, popřípadně nenastane-li žádný bod dotyku, opakovač impedance se stává širokopásmový.

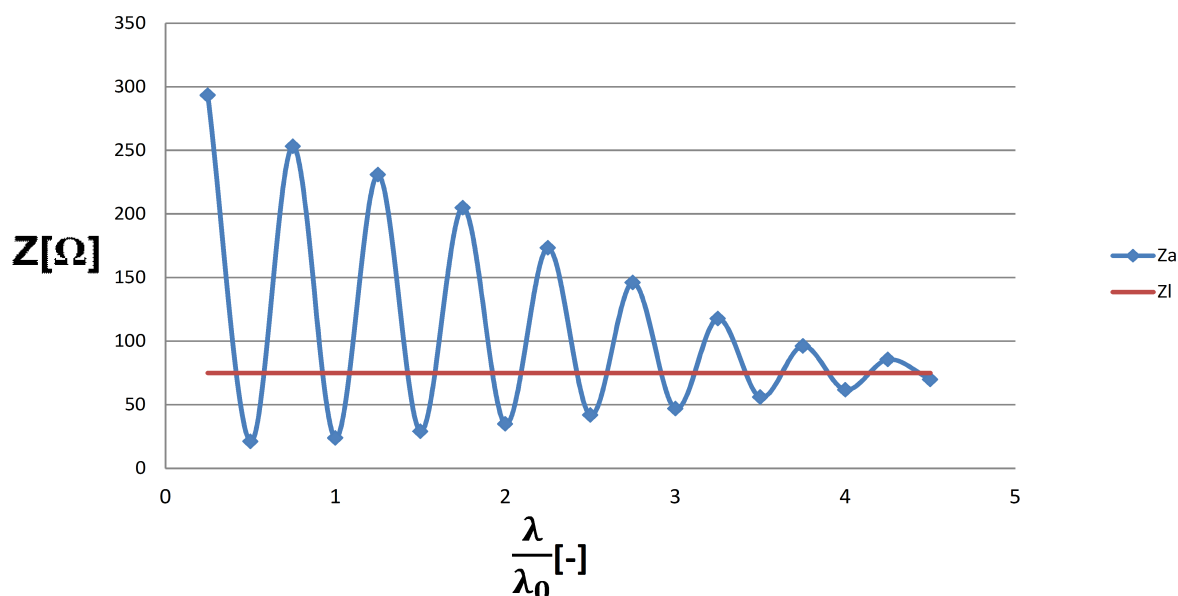
3.4 Impedance při násobcích $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,5$

Podle teorie, se musí ve vzdálenosti $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,5$ hodnota impedance zopakovat. Totéž platí pro celé násobky $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,5$. Měřením jsem ověřoval, jestli se pro užití napaječe ve vzdálenosti celých násobků $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,5$ impedance opravdu transformuje na původní hodnotu. Měření ovšem prokázalo, že ve vzdálenosti $\frac{\lambda}{\lambda_0}=1$ se už impedance neopakuje, nýbrž se transformuje. Impedance se začíná v místě půlvy přibližovat k impedanci napaječe (Obr. 3.25 a Obr. 3.26). Stejně odchylky měříme v lichých násobcích vzdálenosti $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,25$. Při sudých násobcích $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,25$ tak při lichých násobcích $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,25$, začíná převládat impedance napaječe. Od dostatečně velkých násobků, bude hodnota zátěže přenášena jako hodnota vysokofrekvenčního napaječe a to nejen pro $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,5x$, kde $x \in \mathbb{N} \wedge x > 0$, ale pro všechny vlnové délky $\frac{\lambda}{\lambda_0}=n+z$, kde n je dostatečně velký násobek a $z \in \mathbb{R} \wedge x > 0$. Dostatečně násobky, pro které bude impedance zátěže rovná hodnotě impedance napaječe, nelze prověřit mnou používaným měřicím přístrojem, pro svůj omezený frekvenční rozsah.



Obr. 3.25: Impedance napaječe $R_g 58 \text{ c/u}$ Měřením jsem zjistil hodnoty impedance pro sudé i liché násobky $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,25$ vnesl je do grafu a proložil jimi křivku.

Z grafů (Obr.2.25 a Obr.3.26) můžeme vidět jak se impedance, která se má v násobcích opakovače impedance opakovat, se s zvyšujícími násobky poměrně plynule, začíná blížit impedanci napaječe. 75 Ω koaxiální kabel (Obr.3.26) má horší parametry než kabel RG 58 (Obr.2.25). Impedance zátěže se mnohem rychleji začíná přibližovat impedanci napaječe.



Obr. 3.26: 75 Ω koaxiální kabel

3.5 Vyhodnocení měření

Opakování impedance v místě $\frac{\lambda}{\lambda_0} = 0,5$ se podařilo prokázat. Při tomto měření jsem zjistil důležitou vlastnost Vf napaječů a to ,že jejich charakteristická impedance, začne při násobcích $\frac{\lambda}{\lambda_0} = 0,5n$, kde $x \in N \wedge x > 0$,převládat nad impedancí zátěže, až pro $\frac{\lambda}{\lambda_0} = 0,5n$, kde $n \in \infty$, bude $Z = Z_L$. Tento předpoklad jsem nemohl ověřit kvůli nedostatečnému frekvenčnímu rozsahu měřicího přístroje MFJ Analyzátor.

Nejvíce teorii se přiblížila symetrická dvojlinka s charakteristickou impedancí 450 Ω , která nejvčetněji kopírovala hodnoty nasimulované v programu Smith V3. Napaječ RG 58 vykazoval dobré vlastnosti, včetně opakování impedancí v násobcích $\frac{\lambda}{\lambda_0} = 0,5$ (obr. 3.26). Naopak nejhorší přenosové vlastnosti vykazoval koaxiální kabel. Tyto zhoršené vlastnosti můžeme přičíst ke stáří kabelu, možností toho, že byl napaječ v minulosti nepatřičně ohýbán a tak došlo ke změně vzdáleností mezi vodiči. Rovněž opakování impedance v násobcích $\frac{\lambda}{\lambda_0} = 0,5$ (obr. 3.25) vykazuje mnohem rychlejší přibližování impedance zátěže Z_L k Z_L , než je tomu u Napaječe RG 58.

Mnoho nepřesností a odchylek od nasimulovaných hodnot mohlo být také způsobeno parazitní kapacitou, či indukcí, nehomogenicou napaječe v podobě konektorů (Příloha A).

4 Závěr

Jedním z hlavních cílů mé bakalářské práce, bylo popsat a vytvořit materiál pro lazené anténí napaječe, především pak ověřit napaječ ve funkci opakovače impedance, popsat jeho funkci a problémy při použití v aplikacích. V této práci se na opakovač impedance nesnažím pohlížet jako na prostý přenašeč impedance, ale snažím se ho popisovat jako na komplexní složitý celek, jehož užití přináší řadu výhod a prospěchu, ale nese sebou také řadu úskalí a specifických vlastností.

Před samotným studiem problematiky, jsem byl obeznámen pouze s faktem, že Vf vedení o poměrné délce $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,5$ opakuje impedanci zátěže na svém druhém konci. Při studiu a zpracování této problematiky, jsem ovšem byl nucen si připustit další fakta spjata s tímto problémem. Proto jsem ve své bakalářské práci měřil Opakovač impedance z těchto tří hledisek:

1. Impedance zátěže v $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,5$
2. Pásmo, ve kterém může být opakovač impedance nasazen
3. Opakování Impedance v násobcích $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,5$

Měření bylo prováděno nedestruktivní metodou, to jest změnou frekvence, respektive změnou λ na Vf napaječi o stejné geometrické délce. Další zjištění se může týkat ověřování prováděného destruktivní metodou, to jest zkracováním a prodlužováním daného Vf napaječe.

Poslední uvedená problematika, (Opakování Impedance v násobcích $\frac{\lambda}{\lambda_0}=0,5$) byla popsána jen letmo, jedná se o rozsáhlou oblast,. Její důležitost můžeme uvést na potřebě přenosu obdélníkových signálů po impedančním opakovači. Obdélníkový signál se skládá z sinusového signálu a jeho vyšších harmonických složek, jejíž amplituda se bude díky popisovanému efektu (kapitola 3.4) měnit.

Z hlediska telekomunikací je opakování impedance jednou z prakticky využitelných vlastností půlvlnného vedení, které si zaslouží hlubší studium dané problematiky.

5 Použitá literatura

- [1] FAJKUS P, *Modely silových vedení pro přenos dat PLC systémů*. Brno, 2009, Bakalářská práce na FEKT VUT v Brně, vedoucí: doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
- [2] *Multimediální učebnice[online]*. 2010, [cit. 30.4.2013].
<<http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=9-1-A>>
- [3] DVORSKÝ, Marek. *Antény 3*. Vyukový materiál. Ostrava 2012
- [4] *Vf kabely*. [online]2012 [cit. 30.4.2013].<http://pandatron.cz/?255&vf_kabely>
- [5] BOCEK, Jan, KLIMČÍK, Tomáš. *Elektronické měření*
[online]<<http://www.ok1cjb.cz/pdf/Elmer09.pdf>>
- [6] ŠKVOR, Zdynek. *Impedanční přizpůsobení*[online]
[30.4.2013]<<http://www.skvor.cz/pdf/impmatch2.pdf>>
- [7] DVORSKÝ, Marek, MICHÁLEK, Libor. *Frequency Bandwidth of Half-Wave Impedance Repeater*, Ostrava 2012
- [8] Petrus, Jaromír *Smithův diagram s parametrickými impedančními a admitančními parametry*
[online] [cit. 30.4.2013]<<http://jardik.wz.cz/17p2/smithuc.pdf>>
- [9] NOVÁK, Josef. *3dB šířka pásma*, Ostrava 20.5.2010
- [10] Aldebaran Group for Astrophysics. *Elektromagnetické vlny*[online][cit. 30.4.2013]
<http://www.aldebaran.cz/studium/fyzika/elmg_p.html#vlnovod>
- [11] OK2ZAR. *Baluny*[online]2012 [cit. 2013] <http://www.ok2zar.cz/php/show_page.php?soubor=baluny/baluny.html>
- [12] *Multimediální učebnice[online]*. 2010, [cit. 30.4.2013].
<www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/beva/lecture/lect_05.pdf>

Seznam příloh

Příloha A: Konektory s koncovými zátěžemi.....	2
Příloha B Koaxiální napaječ 75Ω	3
Příloha C Dvoulinka 450Ω	4
Příloha D Anténí analyzér MFJ-269 Inv. Číslo: 78002092.....	4



Příloha A: Konektory s koncovými zátěžemi



Příloha B Koaxiální napajec 75Ω



Príloha C Dvoulinka 450 Ω



Příloha D Anténí analyzér MFJ-269 Inv. Číslo: 78002092